

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОПЕРАТИВНОЙ ОКЕАНОЛОГИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СВОЙСТВ ОКЕАНСКОЙ ТОЛЩИ**Л.А. Краснодубец<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Севастопольский государственный университет,  
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

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

Представлены результаты исследования возможного применения для использования в оперативной океанологии предложенного автором базового метода вертикального профилирования океанской толщи как стратифицированной водной среды, обеспечивающего в реальном времени измерение плотности морской воды *in situ* как функции глубины. Метод помимо профилей плотности морской воды позволяет формировать массивы данных о распределениях полной и термохалинной вертикальной устойчивости слоёв водной массы и соответствующие профили частоты Вайсяля-Брента термохалинных колебаний. Рассмотрены применения метода для построения алгоритмов умного профилирования, существенно сокращающих время проведения океанологических станций, а также алгоритмов синхронного профилирования. Исследованы вопросы оптимизации процессов динамических измерений. Приведены результаты компьютерного моделирования.

**Ключевые слова:** профилограф, стратификация океана, компьютерная модель, плотность морской воды, динамические измерения, частота Вайсяля-Брента, вертикальная устойчивость.

Поступила в редакцию: 21.02.2022.

**Введение.** Новое направление океанологии – «оперативная океанология», предметом которой является получение диагностических и прогностических оценок состояния океана в режиме, близком к реальному времени [1], предполагает системное изучение природных параметров, создание систем комплексного измерения свойств водной толщи, систем оперативного сбора и передачи данных, а также ассимиляции новых данных в модели. Содержание нового направления океанологии «оперативная океанология» – комплексная оценка текущего состояния океанской среды и прогноз его изменчивости.

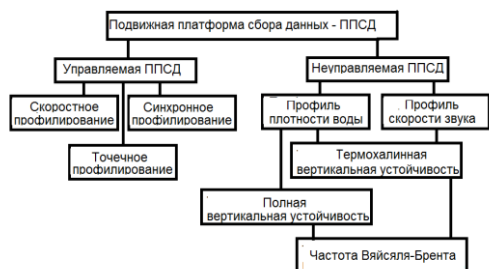
Статья посвящена исследованию различных применений метода динамических измерений вертикального профиля плотности морской воды [2] с помощью неуправляемых и управляемых автономных морских зондов – профилографов для получения диагностических оценок состояния океанской толщи в режиме, близком к реальному времени, а также разработке методов и систем оперативного сбора данных с морских автономных подвижных платформ.

**Измерения с подвижных платформ сбора данных.** Измерение называют динамическим, если нельзя пренебречь изменением величины во времени. К динамическим измерениям можно отнести измерения неизменяющихся во времени величин при помощи средств измерений, установленных на подвижных платформах сбора данных – ППСД (Mobile Data Collection Platform), которые в таком случае можно назвать системами динамических измерений – СДИ (Dynamic Measurement System).

На рис. 1 показана схема, иллюстрирующая применение ППСД при построении СДИ для решения задач оперативной океанологии.

ППСД разделяют на неуправляемые и управляемые, среди которых различают автономные и неавтономные.

Среди неуправляемых ППСД в настоящее время для исследования свойств водной толщи и, в частности, вертикальных профилей электропроводимости и температуры получили широкое распространение морские *CTD* зонды – профилографы, которые выпускаются большим числом производителей и имеют множество типов и модификаций.



**Рис. 1.** Применения ППСД в задачах оперативной океанологии

**Fig. 1.** MDCP application in the tasks of operational oceanology

Управляемые ППСД, представляющие собой высокотехнологичные изделия, так же используются в качестве автономных морских *CTD* профилографов, оснащённых регуляторами плавучести, спутниковой связью и функцией программирования режимов вертикального движения как при погружении, так и при всплытии.

Процессы динамических измерений описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, правые части которых содержат измеряемый сигнал  $x(t)$ . Для восстановления измеряемого сигнала требуется решение обратной задачи динамики.

Динамическая погрешность при передаче сигнала  $x(t)$  по измерительному каналу со статическим коэффициентом передачи  $k$  определяется по формуле

$$\Delta_{дин} = y(t) - kx(t) = y(t) - y_{СТ},$$

где  $y(t)$  сигнал на выходе канала СДИ;  $k$  – коэффициент передачи;  $y_{СТ}$  – установившийся сигнал на выходе измерительного канала СДИ.

Динамические погрешности могут быть определены только расчетно-экспериментальным путем или в процессе компьютерного моделирования. Например, при помощи построения переходных характеристик для измерительных каналов с целью определения сигнала  $y(t)$  как реакции на типовой сигнал  $x(t)$ .

Эталонов и образцовых средств в об-

ласти динамических измерений нет.

**Данные и методы.** Операция определения вертикального профиля плотности морской воды согласно стандарту *WOCE* предусматривает измерение её *CTD* параметров (*CTD* – *conductivity, temperature, depth*), которые в результате последующей обработки приводят к вычислению абсолютной солёности  $S_A$ , которая, в свою очередь, используется для определения плотности морской воды с помощью термодинамического уравнения состояния морской воды *TEOS-10* [3]. Полученные таким путём вертикальные профили плотности морской воды как стратифицированной океанской среды могут использоваться для решения различных задач. Например, для определения характеристик стратификации океанской среды – вертикальной устойчивости образующих её водных масс и параметров термохалинных колебаний требуются прямые измерения *in situ* плотности морской воды и её приращения как функций гидростатического давления, а также градиента плотности по давлению [4]. Однако, такой подход к определению параметров стратификации для оперативной океанологии мало пригоден из-за многоступенчатой процедуры вычисления плотности по данным *CTD* измерений, которая выполняется, как правило, после эксперимента, проводимого во время океанологической станции.

Для оперативного измерения *in situ* вертикального распределения плотности морской воды в океанской среде предложен метод динамических измерений вертикального профиля плотности морской воды *in situ* с помощью ныряющего автономного морского зонда – профилографа [2]. При этом вычисление плотности морской воды и её приращения производится по данным траекторных измерений, выполняемых бортовой навигационной системой. Эти данные усваиваются математической моделью процесса профилирования, устанавливающей динамическую связь между плотностью окружающей морской воды и траекторными параметрами вертикального движения в этой воде погружаемого ав-

тономного зонда с известными массогабаритными характеристиками. Использование такой модели даёт возможность поставить обратную задачу динамики, решение которой приводит к построению алгоритмической структуры информационной системы, обеспечивающей в ходе погружения неуправляемого автономного зонда определение вертикального профиля плотности морской воды и её приращения в зависимости от глубины (давления), а также градиента плотности по давлению [2].

Научной основой этого метода служит математическое описание процесса динамического измерения плотности морской воды и её приращения по глубине (давлению) в форме дифференциального уравнения, описывающего вертикальное движение в стратифицированной океанской среде корпусной части автономного морского зонда с известными формой и размерами, в следующем виде [2]

$$\ddot{z}(t) = -a\dot{z}(t)|\dot{z}(t)| + f_p(z), \quad t \in [t_0, t_f], \quad (1)$$

где

$$a = \frac{C_x S_m}{2V}, \quad f_p(z) = \left[ 1 - \frac{\Delta\rho(z)}{\rho^0} \right] g \quad (2)$$

с начальными условиями:

$$t_0 = 0; \quad z(t_0) = z_0; \quad \dot{z}(t_0) = \dot{z}_0, \quad (3)$$

где  $C_x$ ,  $S_m$ ,  $V$  – конструктивные параметры корпусной части морского зонда;  $\Delta\rho_c(z)$  – приращение плотности морской воды как функция глубины  $z$ ;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho^0$  – плотность морской воды в поверхностном слое.

Особенность уравнения (1) заключается в том, что возмущающая функция, стоящая в правой его части, зависит от приращения плотности окружающей зонд морской воды. Это даёт возможность определить базовый метод динамических измерений вертикального профиля океанской толщи путём постановки и решения обратной задачи динамики – по данным текущих измерений траекторных параметров вертикального

движения корпусной части морского зонда в стратифицированной воде определить приращение её плотности как функции глубины, а также построить вертикальный профиль соответствующего распределения результатов измерений плотности морской воды *in situ* с учётом начальных условий.

Выражения, определяющие искомую плотность и её приращение как функции глубины, в соответствии с базовым методом имеют следующий вид:

$$\rho(z) = \rho^0 \left\{ 2 - \frac{1}{g} [\ddot{z}(t) + a\dot{z}(t)^2] \right\}, \quad (4)$$

$$\Delta\rho(z) = -\frac{\rho^0}{g} [\ddot{z}(t) + a\dot{z}(t)^2 - g]. \quad (5)$$

Принимая начальные условия (3) вместе с известными параметрами  $\rho^0$  и  $a$  за исходные данные, а функции  $\ddot{z}(t)$  и  $\dot{z}(t)$ , входящие в правую часть уравнения (4) доступными для измерения (соответственно вертикальные составляющие ускорения и скорости погружения), можно вычислять текущую глубину  $z(t)$  и соответствующую ей плотность морской воды  $\rho(z)$ , которую путем перемножения с известной константой  $\rho^0$  можно преобразовать в искомую плотность  $\rho(z)$ .

Таким образом, для решения задачи построения вертикального профиля плотности морской воды за время профилирования требуются данные о текущих значениях глубины, а также вертикальных составляющих скорости и ускорения процесса погружения зонда. Эти данные могут быть получены двумя способами: прямым измерением при помощи акселерометра или косвенным путем дифференцирования прямых измерений гидростатического давления.

С помощью выражения (5) с соответствующими начальными условиями можно вычислять изменение плотности морской воды в зависимости от глубины. Если приращение плотности требуется вычислить как функцию давления, то можно воспользоваться основным уравнением гидростатики, в соответствии с

которым

$$p = p_0 + \rho g z, \quad (6)$$

где  $p$  и  $\rho$  – гидростатическое давление и плотность морской воды, соответствующие глубине  $z$ ;  $p_0$  – давление атмосферы на океанскую поверхность;  $g$  – ускорение свободного падения.

**Динамические измерения характеристик стратификации океана.** Условия вертикальной стратификации морской воды характеризуются термохалинной устойчивостью – параметром, который в соответствии с методом Т. Хессельберга и Х. Свердрупа [4] выражается через градиенты солёности и температуры *in situ* по давлению окружающей среды, которые в соответствии со стандартом *WOCE* формируются по данным профильных измерений *CTD* параметров океанской среды. Подобные вычисления, как правило, выполняются после завершения эксперимента по профилированию. Поэтому для решения задач оперативной океанологии нужно искать и разрабатывать новые методы, обеспечивающие в режиме реального времени получение характеристик стратификации океанской толщи.

Как было показано, базовый метод [2] профилирования позволяет построить вертикальный профиль плотности морской воды как функцию давления, а также градиент плотности по давлению практически в реальном времени. Это даёт возможность вычислять полную вертикальную устойчивость по формуле [4]

$$E = g \frac{d\rho}{dp}. \quad (7)$$

В соответствии с алгоритмом, следующим из выражений (4)–(6), можно выполнить построение вертикального профиля плотности морской воды, а также её приращения как функций давления в ходе процесса погружения зонда (то есть в реальном масштабе времени) по текущим измерениям траекторных параметров его вертикального движения, поступающих от бортовой навигационной системы. При этом параллельно

можно вычислять градиент плотности по давлению, что даёт возможность по формуле (7) рассчитать полную вертикальную устойчивость –  $E$ , а с её помощью вычислить частоту Вьяйсяля-Брента –  $N$  и соответствующий ей период –  $T$  термохалинных колебаний, вызванных вертикальным перемещением водной массы

$$N^2 = gE, \quad T = 2\pi / N.$$

Известен метод М. Поллака, который основан на представлении зависимости адиабатического градиента плотности от скорости звука. В таком случае выражение для термохалинной устойчивости имеет следующий вид [4, 5]:

$$E_{\theta,s} = g \left[ \frac{d\rho}{dp} - \frac{1}{C^2} \right], \quad (8)$$

где  $C$  – скорость звука в морской воде на текущей глубине и соответствующих этой глубине статическом давлении и плотности морской воды.

Таким образом, введение в структуру СДИ характеристик стратификации океанской среды параллельного канала измерения скорости звука в морской воде позволяет дополнительно строить в реальном времени (параллельно с основным каналом плотности) не только вертикальное распределение скоростей звука в стратифицированной морской среде, но также строить распределение термохалинной вертикальной устойчивости в соответствии с методом М. Поллака.

На рис. 2 показана структура СДИ, предназначенной для оперативной оценки стратификации океанской среды.

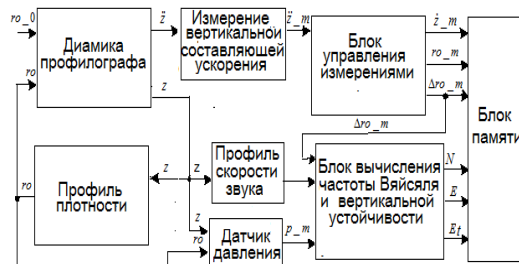


Рис. 2. Структура СДИ  
Fig. 2. The structure of a DMS

На рис. 3 приведен график вертикального профиля плотности морской воды, полученный на океанологической станции в Чёрном море.

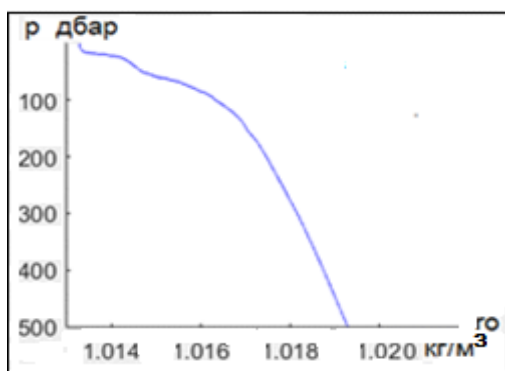


Рис. 3. Профиль плотности морской воды  
Fig. 3. Seawater density profile

Программно-алгоритмическая структура, изображённая на рис. 2, предназначена для компьютерного моделирования СДИ, работающей в реальном времени. Однако, её можно с успехом использовать для построения характеристик стратификации океанской среды с помощью архивных файлов, содержащих оцифрованные данные вертикальных профилей плотности морской воды и хранящихся в базах данных вместе с тегами о дате, времени и месте состоявшихся океанологических станций. На рис. 4 приведен график распределения полной вертикальной устойчивости слоёв водных масс по данным профиля, изображённого на рис. 3.

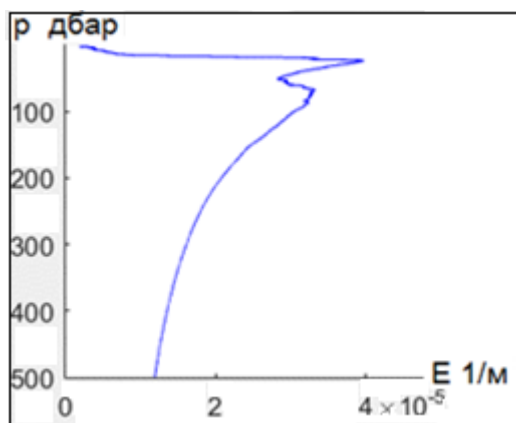


Рис. 4. Вертикальная устойчивость  
Fig. 4. Vertical stability

На рис. 5 приведен график распределения частоты термохалинных колебаний Вьяйсяля-Брента, который построен по данным вертикальной устойчивости.

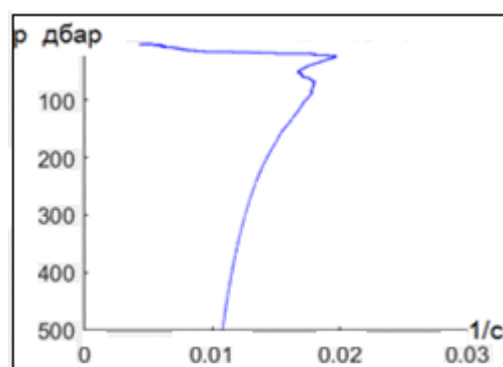


Рис. 5. Распределение частоты Вьяйсяля-Брента  
Fig. 5. Väisälä-Brent frequency distribution

Как следует из вышеизложенного, для построения вертикального профиля плотности морской воды, с помощью предложенной СДИ, не требуется выполнять измерения её температуры. Однако, при необходимости канал измерения температуры можно включить в состав структуры СДИ и тем самым обеспечить построение вертикального профиля температуры параллельно с другими профилями.

**Повышение точности динамических измерений.** Применение подвижных платформ сбора данных для транспортировки инерционных датчиков, входящих в СДИ, накладывает ограничения на выбор скоростных режимов погружения зонда, скорость которого должна выбираться (при проектировании корпусной части или с помощью регулятора плавучести) с учётом допустимых динамических ошибок, вызываемых инерционными свойствами измерителей параметров окружающей среды, а также вертикальных составляющих ускорения  $\ddot{z}(t)$  и скорости  $\dot{z}(t)$ .

Для снижения таких ошибок рассчитывают допустимые скорости перемещения подвижных платформ, исходя из постоянных времени, используемых датчиков и погрешности измерений.

Программой *WOCE* установлено, что погрешность измерения температуры

морской воды не должна превышать  $\Delta t = 0,002^\circ \text{C}$ . При использовании на зонде-профилографе датчиков температуры фирмы *SBE* постоянная времени датчика оценивается величиной  $\theta_t = 0,065 \text{ с}$ . В работе [6] показано, что в таком случае динамическая погрешность измерения температуры не превысит значения  $(\Delta t)_{\text{дин}} \leq (\Delta t)_{\text{стат}} = 0,0012^\circ \text{C}$  в слое максимального градиента температуры, если скорость вертикального движения профилографа не превысит значения

$$V_{\text{дон}} \leq (0,24 \dots 0,05) \text{ м/с}. \quad (9)$$

При использовании критерия (9) скорость вертикального движения профилографа должна определяться по скорости изменения давления в единицах децибар (дбар), а текущий градиент температуры должен вычисляться по данным получаемой информации непосредственно с помощью бортового микроконтроллера СДИ.

**Оптимизация процессов динамических измерений.** Построение вертикального профиля плотности морской воды при помощи базового метода основано на использовании текущих данных бортовой навигационной системы морского автономного неуправляемого профилографа, которые формируются быстродействующими акселерометрами и обрабатываются микроконтроллером. При этом данные измерений траекторных параметров передаются в специальную цифровую модель, построенную по соотношениям (4) и (5). В роли параметра этой модели используется величина, зависящая от массогабаритных характеристик корпусной части профилографа. В реальных условиях динамика процесса измерений отличается от его модели и возникает задача минимизации этого отклонения в ходе процедуры определения плотности и ее приращения в зависимости от глубины. Кроме этого цифровое моделирование системы (4) и (5) с учетом квантования данных траекторных измерений показало, что в измери-

тельной системе могут возникать шумы квантования в результате аналого-цифрового преобразования, существенно влияющие на точность выполняемых измерений.

Для снижения влияния указанных факторов на процесс динамических измерений, а также механических возмущений, действующих на корпусную часть зонда, ставится задача минимизации отклонения текущих измерений вертикальной составляющей ускорения зонда от соответствующего значения ускорения, формируемого цифровой моделью эталонного процесса измерений, определяемого уравнением (4).

Решение этой задачи предложено искать методом локальной оптимизации, то есть такой оптимизации, которая выполняется в реальном времени в процессе определения искомого вертикального профиля плотности морской воды, а также ее приращения.

Таким образом, ставится оптимизационная задача: найти такое значение плотности морской воды  $\rho$ , при котором будет обеспечен минимум отклонения фазовых траекторий текущего процесса измерений от соответствующих траекторий модельного процесса, формирующего искомый вертикальный профиль.

Если принять за меру отклонения математической модели измерений от реального процесса в приборной системе квадратичный критерий в форме функционала, содержащего квадрат разности ускорений профилографа и соответствующей координаты модельного процесса, то критерий оптимизации примет вид

$$G(\rho) = \frac{1}{2} [\dot{v}_{\text{изм}} - \dot{v}(\rho)]^2, \quad (10)$$

где  $\dot{v}_{\text{изм}} = \ddot{z}_{\text{изм}}$  – ускорение, измеренное навигационной системой;  $\dot{v}(\rho) = \ddot{z}(\rho)$  – модельное ускорение.

Далее можно при заданных ограничениях на измеряемые навигационной системой параметры найти выражение для плотности морской воды  $\rho$  из усло-

вия  $G(\rho) = \min$  градиентным методом скоростного спуска, которое имеет вид

$$\frac{d\rho}{dt} = -\lambda \frac{g}{\rho^0} \left[ \dot{v}_{uzm} + av^2 - 2g + \rho \frac{g}{\rho^0} \right], \quad (11)$$

$$t = t_0; \rho(t_0) = \rho^0; v(t_0) = 0; t \geq 0,$$

где  $a$  – конструктивный параметр;  $\rho$  – текущее значение плотности;  $\rho^0$  – плотность морской воды в поверхностном слое;  $g$  – ускорение свободного падения на широте океанологической станции;  $\lambda$  – константа, подлежащая определению. Она характеризует скорость, с которой текущее значение вычисляемой плотности  $\rho(t)$  приближается к оптимальному значению  $\rho_{opt}$ .

Дифференциальное уравнение (11) формирует текущую плотность морской воды как результат оптимального процесса динамических измерений вертикального профиля океанской толщи по текущим данным, поступающим от бортовой навигационной системы, о вертикальной составляющей ускорения и скорости движения корпусной части автономного морского зонда в стратифицированной среде.

**Применение управляемых ППСД для динамических измерений.** Оснащение ППСД системой управления открывает новые возможности расширения измерительной базы для решения задач оперативной океанологии. В частности, для исследований океанской толщи в настоящее время применяются морские автономные профилографы класса *Argo*, построенные на основе морских ныряющих буёв-дрифтеров с регулируемой плавучестью, которые оснащены системой управления и спутниковой связью. Основное назначение таких управляемых ППСД – формирование вертикальных профилей *CTD* параметров до глубин 6000 м [7]. Профилографы *Argo*, флот которых на момент написания статьи насчитывает порядка 4000 буёв, с океанской поверхности погружаются на заданный программой глубинный горизонт, где находятся в свободном дрейфе

10 суток. За время подъёма на поверхность океана со скоростью 9,5 см/с (примерно сутки с глубины 6000 м) бортовая измерительная система формирует профиль *CTD* параметров в виде массива данных, который после всплытия попадает по спутниковому каналу связи в сеть *Internet* и распределяется потребителям, где массивы *CTD* данных обрабатываются в лабораторных условиях с целью вычисления вертикального распределения плотности морской воды, необходимого для построения распределений характеристик стратификации океанской среды.

Каждый профилограф *Argo* пополняет базу данных профилей регулярно через 10 суток. По этой причине, а также в связи с тем, что «поплавки» *Argo* распределены по всем океанам и непрерывно находятся в свободном дрейфе, поставляемые данные в рамках глобальной программы *Argo* для нужд оперативной океанологии малопригодны. Применение «поплавков» *Argo* вне действующей сети в автономном режиме так же не имеет смысла из-за малой скорости вертикального профилирования, среднее значение которой примерно соответствует 0,1 м/с, что хорошо согласуется с критерием (9) и практически исключает динамические искажения при измерении *CTD* параметров, вызванные инерционными свойствами датчиков. Важно отметить, что при такой скоростной режим для регистрации термохалинных профилей океанской толщи до 6000 м может привести к искажению результатов измерений из-за временной и пространственной изменчивости океанской среды. При этом необходимо учитывать затраты на содержание судна и экипажа, выполняющего океанологическую станцию по определению профиля.

Система управления профилографа *Argo* за счёт автоматической стабилизации скоростного режима вертикального профилирования, соответствующего критерию (9), не допускает в его измерительных каналах возникновения режима динамических измерений. Превышение предельной скорости профилирования приводит к существенному росту дина-

мических искажений, что можно рассматривать как переход в режим динамических измерений. При этом для снижения динамических искажений данных требуется дополнительная обработка массива измерений, которая выполняется в лабораторных условиях после завершения эксперимента.

Таким образом, сокращение времени вертикального профилирования является актуальным для успешного решения задач оперативной океанологии, связанных с исследованиями океанской толщи.

**Скоростное профилирование.** Допустимая скорость неуправляемого профилографа, определяемая критерием (9), зависит от значения постоянной времени температурного датчика. Если решается задача определения вертикального профиля только плотности морской воды, то, исключая канал температуры и применяя метод [2], допустимую максимальную скорость профилирования можно будет увеличить на порядок.

Снижение времени на выполнение операций профилирования, выполняемых путём измерений *CTD* параметров океанской среды при помощи автономного морского профилографа с регулируемой плавучестью возможно на основе построения системы управления скоростными режимами его вертикального движения [8]. При этом рассматриваются две фазы процесса профилирования: погружение и всплытие. В целях экономии энергетических ресурсов на фазе погружения автономный профилограф может совершать неуправляемое движение до заданной глубины с некоторой средней крейсерской скоростью  $v_{кр} \gg v_{дон}$ , предустановка которой выполняется с помощью регулятора плавучести. При этом профилирование осуществляется подобно тому, как это делают профилографы *Argo*, на фазе всплытия с вертикальной скоростью  $v \leq v_{дон}$ . В таком случае время проведения эксперимента (океанологической станции) для формирования массивов измерений, необходимых для построения вертикального профиля, будет снижено за счёт сокращения длительности

фазы погружения. При этом речь идет о некотором среднем значении крейсерской скорости, так как при вертикальном свободном погружении (всплытии) автономного профилографа при неизменной силе гравитации, действующей на корпус профилографа, в стратифицированной морской среде значение предустановленной крейсерской скорости будет изменяться под действием выталкивающей силы, зависящей, в свою очередь, от изменения плотности окружающей морской воды. Например, при установке  $v_{кр} = 2$  м/с в приповерхностном слое время погружения до глубины 2000 м в однородной среде составит примерно 17 мин, что в 20 раз быстрее, чем это делает профилограф класса *Argo*. При движении автономного профилографа в условиях стратифицированной окружающей среды время погружения до заданной глубины увеличится, так как плотность воды в океане растёт с глубиной. Поэтому для ускорения фазы погружения профилографа и выведения его на заданную глубину с нулевой скоростью следует применять адаптивный регулятор.

Временные затраты на получение вертикального *CTD* профиля так же могут быть снижены и на фазе всплытия за счет применения умного профилирования [9] в режиме управляемого вертикального движения профилографа, скорость которого автоматически снижается от  $v_{кр}$  до  $v \leq v_{дон}$  при переходе границы разделения горизонтальных слоев воды с различной плотностью и восстанавливается до крейсерского значения в области установившихся значений плотности, окружающей профилограф воды.

На рис. 6 представлена структурная схема моделирования системы автоматического управления динамикой процессов профилирования, которая обеспечивает два скоростных режима профилирования. В рабочем режиме адаптивный регулятор подключён к мехатронному приводу, обеспечивая стабилизацию вертикальной скорости профилографа на уровне, гарантирующем выполнение критерия (9).



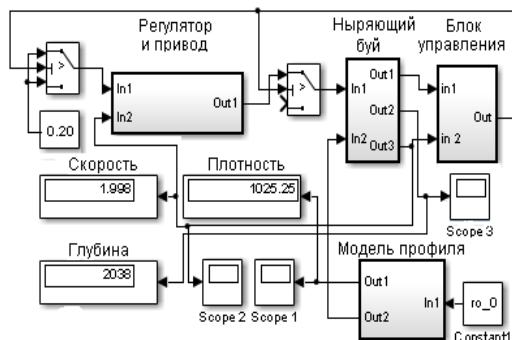


Рис. 6. САУ профилированием  
Fig. 6. ACS Profiling

В крейсерском режиме регулятор отключается и неуправляемый профилограф движется с установившейся скоростью, величина которой значительно превосходит рабочую и определяется плотностью окружающей морской воды и конструкцией его корпуса.

На рис. 7 показаны результаты моделирования двух видов профилирования.

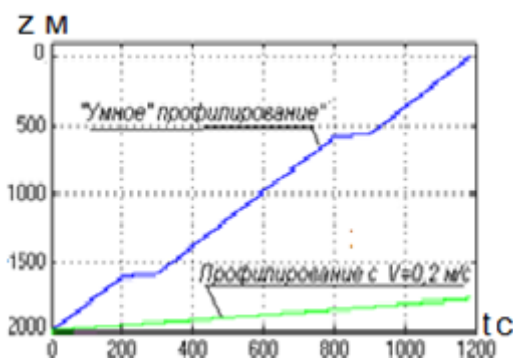


Рис. 7. Графики профилирования  
Fig. 7. The profiling charts

**Групповое синхронное профилирование.** Построение комплексного трехмерного мониторинга океанской среды с учетом профильных измерений невозможно без решения ключевых проблем, связанных с разработкой методов управления движением автономных морских профилографов с регуляторами плавучести и их группировок. При этом так же должна быть разработана концепция построения морской наблюдательной системы для мониторинга океанской среды, использующей группировку совместно работающих smart профилографов, удаленных друг от друга на значительные расстояния и управляемых

из единого центра посредством спутниковой связи. Более того, для smart профилографа можно спроектировать терминальный адаптивный регулятор [9], который даст возможность переводить профилограф из исходного состояния на океанской поверхности на заданную глубину за требуемое время и задавать время выхода группировки морских роботов-профилографов на заданный горизонт синхронно во времени. Это весьма важно, например, для исследования характеристик тонкой структуры вод океана и внутренних волн.

**Заключение.** Применение метода динамических измерений вертикального профиля плотности морской воды в стратифицированной океанской среде как базового метода для разработки алгоритмически-программного обеспечения реального времени морских автоматических информационно-измерительных систем позволяет расширить измерительную базу оперативной океанологии в области исследований океанской толщи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленько А.А. Оперативная океанология: моделирование, мониторинг и прогнозирование гидрофизических полей Мирового океана: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Севастополь. 2018. 251 с.
2. 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.
3. Wright D.G., Pawlowicz R., McDougall T.J., Feistel R., Marion G.M. Absolute Salinity, "Density Salinity" and the Reference-Composition Salinity Scale: present and future use in the seawater standard TEOS-10 // Ocean Sci., 2011. № 7. P. 1–26.
4. Lynne D. Talley. Descriptive Physical Oceanography. Academic Press Inc.(London). 2011. 564 p.
5. Архипкин В.С., Добролюбов С.А. Океанология. Физические свойства мор-

ской воды: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. М.: Изд-во Юрайт, 2020. 216 с.

6. *Краснодубец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В.* Управление морскими буями-профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Модели движения // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 69–79.

7. <https://argo.ucsd.edu/how-do-floats-work/> (дата обращения: 04.02.2022).

8. *Краснодубец Л.А.* Морские наблюдательные системы с подвижными платформами сбора данных. Севастополь: ИПТС. 2018. 208 с.

9. *Краснодубец Л.А.* Концепция применения и моделирование морского автономного *smart* профилографа // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 3. С. 106–113.

## DYNAMIC MEASUREMENTS IN THE PROBLEMS OF OPERATIONAL OCEANOLOGY IN THE STUDY OF THE PROPERTIES OF THE OCEANIC PLATE

L.A. Krasnodubets<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

<sup>2</sup>Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The results of a study of the possible application of the basic method of vertical profiling of the oceanic column as a stratified aquatic environment, proposed by the author for using in operational oceanology, are presented. The method provides real-time measurement of the density of sea water in situ as a function of depth. In addition to seawater density profiles, the method allows generating data arrays on the distributions of the total and thermohaline vertical stability of water mass layers and the corresponding Väisälä-Brunt frequency profiles of thermohaline oscillations. Applications of the method for the construction of smart profiling algorithms, which significantly reduce the time of oceanographic stations, as well as synchronous profiling algorithms, are considered. The issues of optimization of processes of dynamic measurements are investigated. The results of computer simulation are presented.

**Keywords:** profiler, ocean stratification, computer model, seawater density, dynamic measurements, Väisälä-Brunt frequency, vertical stability.

## REFERENCES

1. *Zelen'ko A.A.* Operativnaya okeanologiya: modelirovaniye, monitoring i prognozirovaniye gidrofizicheskikh poley Mirovogo okeana: dis. d-ra fiz-mat nauk (Operational Oceanology: Modeling, Monitoring and Forecasting of the Hydrophysical Fields of the World Ocean: Thesys for the Doctor of Physics and Mathematics), Sevastopol', 2018, 251 p.

2. *Krasnodubets L.A.* Metod opredeleniya vertikal'nogo profilya plotnosti morskoy vody na osnove izmereniy parametrov dvizheniya nepravlyayemogo 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.

3. *Wright D.G., Pawlowicz R., McDougall T.J., Feistel R., and Marion G.M.* Absolute Salinity, “Density Salinity” and the Reference-Composition Salinity Scale: present and future use in the seawater standard TEOS-10. *Ocean Sci.*, 2011, No. 7, pp. 1–26.

4. *Lynne D. Talley.* Descriptive Physical Oceanography. Academic Press Inc. (London), 2011, 564 p.

5. *Arhipkin V.S., Dobrolyubov S.A.* Okeanologiya. Fizicheskiye svoystva morskoy vody (Physical properties of sea water), Moscow: Izd-vo Yurayt, 2020, 216 p.

6. *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 marine profiler buoys as a method for increasing the representativeness of thermohaline measurements. Motion models). *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2012, No. 4, pp. 69–79.

7. <https://argo.ucsd.edu/how-do-floats-work/> (February 04, 2022)

8. *Krasnodubets L.A.* Morskiye nablyudatel'nyye sistemy s podvizhnymi platformami sbora dannykh (Marine observation systems with mobile data collection platforms), Sevastopol': IPTS, 2018, 208 p.

9. *Krasnodubets L.A.* Kontseptsiya primeneniya i modelirovaniye morskogo avtonomnogo smart profilografa (The concept of application and modeling of a marine autonomous smart profiler). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2020, No. 3, pp. 106–113. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-3-106-113.