



## НОВЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ОПЕРАТИВНОГО АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ВОД ОКЕАНСКОЙ СРЕДЫ

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

*Посвящается светлой памяти выдающегося учёного и заслуженного изобретателя, внёсшего значительный вклад в создание и развитие отечественного экологического приборостроения, доктора технических наук, профессора, заведующего лабораторией Института природно-технических систем  
Виталия Александровича Гайского*

Представлено решение задач оперативного анализа состояния вертикальной стратификации океанской среды на основе использования запатентованного В.А. Гайским нового гидростатического способа прямого измерения плотности природных вод и обновлённого оригинального метода динамических измерений вертикального профиля плотности морской воды с помощью морского зонда-профилографа. Приведены результаты компьютерного моделирования в виде графиков распределений основных характеристик стратификации относительно гидростатического давления – плотности морской воды, вертикальной устойчивости слоёв водных масс и частоты Вьяйсяля-Брента термохалинных колебаний глубинных волн.

**Ключевые слова:** стратификация, вертикальная устойчивость, частота Вьяйсяля-Брента, морской зонд, плотность морской воды, компьютерное моделирование, гидростатическое давление.

Поступила в редакцию: 13.11.2023. После доработки: 29.11.2023.

**Введение.** В последние годы Гайский В.А. как руководитель лаборатории много внимания уделял разработке принципов построения гидростатических измерителей плотности океанской среды, справедливо полагая, что использование таких приборов в качестве базовых при зондировании океанской толщи позволит существенно упростить анализ состояния стратификации океанских вод.

Вертикальная стратификация океанской среды проявляется в результате образования на различных глубинах горизонтальных слоёв морской воды с одинаковой плотностью. Для количественной оценки состояния вертикальной стратификации введены следующие характеристики: вертикальная устойчивость  $E$  и частота Вьяйсяля-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 до сотен километров. При этом вертикальная структура океанской среды может на длительное или короткое время оставаться неизменной [1]. Поэтому наблюдения за динамикой вертикального перемещения водных масс нуждаются в разработке методов 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. При этом решались задачи разработки алгоритмического и программного обеспечения для нужд оперативного анализа состояния

вертикальной стратификации вод океанской среды, а именно для автоматического построения в режиме, близком к реальному времени (в процессе движения автономного морского зонда-профилографа) и распределений основных характеристик вертикальной стратификации как функций гидростатического давления.

**Данные и методы.** Вычисление характеристик вертикальной стратификации можно выполнить по известным соотношениям [2]

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

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

Как следует из соотношений (1), базовой операцией для определения вертикальной устойчивости  $E$  и соответствующей ей частоты Вэйсяля-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 обработки результатов эксперимента в районе океанографической станции, либо в процессе погружения морского зонда-профилографа 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 термохалинных 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 мор-

ской воды и гидростатического давления, а солёность определяется косвенным методом на основе прямых измерений электропроводности  $C$  или скорости распространения звука  $V$  в исследуемой среде. При этом 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 термохалинным параметрам в соответствии с 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, обеспечивающими допустимые динамические искажения в измерениях датчика температуры, имеющего наибольшую постоянную времени по сравнению с другими сенсорами, установленными на борту *CTD* профилографа.

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

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

Увеличить скорость профилирования можно за счёт исключения из состава информационно-измерительного канала бортовой аппаратуры звена с наибольшей постоянной времени – датчика температуры, а также применения метода

динамических измерений вертикального профиля плотности морской воды как функции гидростатического давления, который основан на применении зонда-профилографа, оснащённого бортовой системой измерений траекторных параметров его вертикального движения [3]. Однако, этот метод имеет два существенных недостатка:

1) для измерения траекторных параметров вертикального движения зонда-профилографа необходимо использовать дорогостоящий модуль инерциальной навигации;

2) требуется измерение плотности морской воды непосредственно вблизи океанской поверхности в районе океанографической станции как начального значения для циклической процедуры вычисления массива значений плотности морской воды.

Для устранения первого недостатка поступим следующим образом.

Так как в основе рассматриваемого метода лежит математическое описание процесса динамического измерения плотности морской воды  $\rho$  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, то для измерения глубины  $z$  и скорости погружения морского зонда  $\dot{z}$  с помощью инерциальной системы требуется акселерометр и два интегратора.

Далее, применяя метод гидростатического приближения, построим по аналогии с [3] процесс динамических измерений приращения плотности морской воды  $\Delta\rho$  как функции гидростатического давления  $p$ . При этом выражение для приращения плотности морской воды  $\Delta\rho$  представим по аналогии с [4] в следующем модифицированном виде:

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

$$t_0 = 0; p(t_0) = p_0; \dot{p}(t_0) = \dot{p}_0. \quad (3)$$

где  $\rho^0$  – начальная плотность морской воды, измеренная на поверхности перед погружением зонда-профилографа;

$g$  – ускорение свободного падения на широте станции измерения профиля;

$a = \frac{C_x S_m}{2V}$  – конструктивный параметр,

зависящий от коэффициента лобового сопротивления  $C_x$ , площади поперечного сечения  $S_m$  и объёма  $V$  корпусной части автономного зонда-профилографа.

Знание начальной плотности  $\rho^0$  позволяет с учётом соотношения

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

получить из (2) выражение для плотности морской воды как функции гидростатического давления в виде

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

Таким образом, полученные соотношения (2) и (4) с начальными условиями (3) определяют важнейшую характеристику морской воды – плотность в океанской толще, как функцию давления. Если учесть сжимаемость морской воды, то такая замена вертикальной координаты  $z$  имеет преимущества и с физической точки зрения [5].

Анализ соотношений (2) и (4) приводит к представлению некой алгоритмической структуры, имеющей входы и выходы. При этом в качестве входов рассматриваются следующие переменные и константы:

$p(t)$  – гидростатическое давление;

$\rho^0$  – 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 глубины (гидростатического

давления).

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

В соответствии с методом динамических измерений данные непосредственных измерений текущих значений забортного гидростатического давления передаются в специальную цифровую динамическую модель, построенную на базе конечно-разностного уравнения, соответствующего (2). При этом первая и вторая производные вычисляются через соответствующие разности. Модель включается с началом профилирования при начальных условиях (3) и работает в режиме, близком к реальному времени, в течение всего периода профилирования, формируя на выходе текущие значения плотности  $\rho(p)$  и её приращение для морской воды  $\Delta\rho(p)$  в зависимости от текущего значения гидростатического давления  $p(t)$ . При этом вместо инерциальной системы понадобится только один датчик гидростатического давления и, возможно, два дифференцирующих устройства, если не используется конечно-разностное уравнение.

Для устранения второго недостатка метода динамических измерений, связанного с необходимостью измерения плотности морской воды непосредственно в приповерхностном слое океанской среды перед началом профилирования, воспользуемся новым гидростатическим дифференциальным измерителем запатентованным Гайским В.А. в 2023 году [6]. Главное отличие этого устройства от известных гидростатических дифференциальных измерителей плотности жидкостей состоит в том, что измеряемая плотность жидкости выражается через сумму известной плотности эталонной жидкости плюс (или минус) её приращение, вызванное изменением гидростатического давления жидкости в измеряемой среде, а также тем, что заявлена возможность прямых измерений плотности жидкостей при больших значениях гидростатического давления.

Принцип работы рассматриваемого устройства, предназначенного для непосредственного измерения плотности природных вод, поясняется схемой, изображённой на рис. 1.

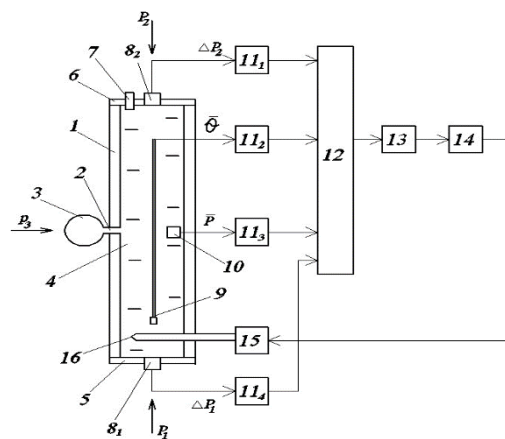


Рис. 1. Схема базового измерителя плотности жидкости

Fig. 1. Basic meter diagram liquid density

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

- 1 – трубка с эталонной жидкостью;
- 2 – патрубок;
- 3 – эластичный баллон;
- 4 – эталонная жидкость;
- 5 и 6 – крышки;
- 7 – пробка;
- 8 – дифференциальный датчик давления;
- 9 – распределённый датчик средней температуры;
- 10 – датчик среднего давления;
- 11 – вторичные преобразователи;
- 12 – коммутатор;
- 13 – АЦП;
- 14 – процессор;
- 15 – генератор сигналов нагрева-охлаждения;
- 16 – ТЭН и охладитель Пельтье.

Локальная плотность жидкости в географической точке на широте  $\varphi$  и глубине  $z$  определяется по следующей формуле

$$\rho(\varphi, z) = \rho_0(\bar{\theta}, \bar{P}) + \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{g(\varphi, z)h},$$

где  $\rho_0(\bar{\theta}, \bar{P})$  – плотность эталонной

жидкости при средней в трубке температуре  $\bar{\theta}$  и среднем давлении  $\bar{P}$ ;  $g(\varphi, z)$  – ускорение свободного падения на широте  $\varphi$  и глубине  $z$ ;  $h$  – вертикальный размер трубки;  $\Delta P_1$  – дифференциальное давление в нижнем торце трубки (разность между внешним и внутренним давлением трубки) на выходе первого датчика;  $\Delta P_2$  – дифференциальное давление в верхнем торце трубки (разность между внутренним в трубке и внешним давлением) на выходе второго датчика.

Устройство имеет потенциальную возможность увеличения точности измерения локальной плотности жидкости за счёт наращивания количества измерительных трубок и разновидности эталонных жидкостей.

При этом следует отметить, что базовый измеритель плотности жидкости, предназначенный для измерения локальной плотности морской воды в глубоководных океанологических приборах, имеет ограниченные возможности по скорости зондирования (профильных измерений), выполняемых в процессе погружения автономного морского зонда, вследствие наличия в его составе инерционных элементов: нагревателя-охладителя, распределённого датчика температуры, а также технологической операции прогрева-охлаждения эталонной жидкости, содержащейся в измерительной трубке.

Таким образом, применение измерителя плотности, предложенного Гайским В.А. для измерения локальной начальной плотности морской воды в приповерхностном слое океана, не только устранит основной недостаток метода динамических измерений вертикального профиля плотности, но также может повысить точность таких измерений.

**Компьютерное моделирование** выполнено в среде MATLAB & Simulink.

Структурная схема моделирования (S-модель) выполнена в виде двух подсистем – профилирования и оперативного анализа.

Модель процесса профилирования построена в виде следующих блоков:

- блок моделирования морской стратифицированной среды, включающий модель профиля плотности морской воды района Чёрного моря как функции гидростатического давления;

- блок моделирования динамики погружения зонда-профилографа;

- блок ввода начального значения плотности морской воды;

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

S-модель процесса профилирования представлена на рис. 2.

Модель процесса оперативного анализа динамического состояния океанской среды выполнена в виде автономного блока, на вход которого поступают значения гидростатического давления (считываются из файла, сформированного в блоке моделирования процесса профилирования), а также ускорение свободного падения в виде константы. В этом блоке вычисляются как результат оперативного анализа текущие ординаты плотности морской воды и её приращение, ординаты полной вертикальной устойчивости водных слоёв и соответствующей частоты Вьяйсяля-Брента термомохаляльных колебаний.

Начальные данные для моделирования:

$\rho^0 = 1,0132640 \text{ г/см}^3$  – начальное значение плотности морской воды (определяется с помощью базового измерителя плотности жидкости, установленного непосредственно в приповерхностном слое океанской среды);

$a = 9,6667 \text{ м}^{-1}$  – конструктивный параметр корпусной части зонда-профилографа, обеспечивающий погружение зонда со скоростью 1 м/с;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

постоянные времени датчика давления и устройств дифференцирования:  $T_p = 0,05 \text{ с}$ ;  $T_{d1} = 0,06 \text{ с}$ ;  $T_{d2} = 0,065 \text{ с}$ .

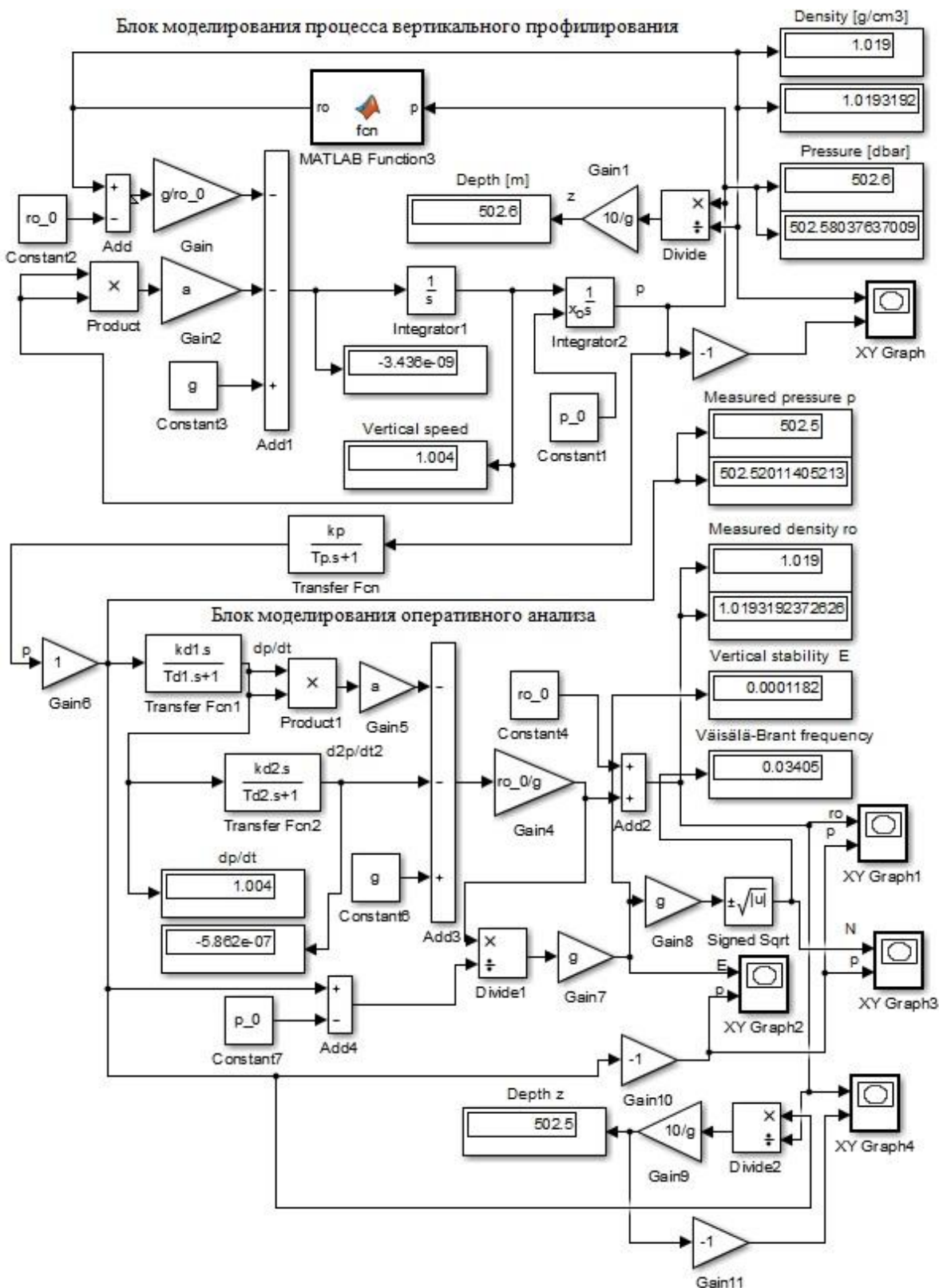


Рис. 2. S-модель процессов вертикального профилирования и оперативного анализа  
 Fig. 2. S-model of vertical profiling and operational analysis processes

**Обсуждение результатов** компьютерного моделирования, выполненного в два этапа в среде визуального моделирования Simulink системы MATLAB.

На первом 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. Перед стартом были введены следующие установки:

$\rho^0 = 1,0132640 \text{ г/см}^3$  – начальное значение плотности морской воды;

$a = 9,6667 \text{ м}^{-1}$  – конструктивный параметр, задающий скорость зонда;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения, соответствующее широте гидрографической станции.

В ходе моделирования процесса профилирования при погружении зонда-профилографа выполнялась регистрация данных, поступающих от датчика давления, установленного на его корпусной части, которые по мере поступления передавались в подсистему оперативного анализа, где практически в реальном времени вычислялись ординаты основных характеристик вертикальной стратификации вод океанской среды, которые формировались в соответствующие массивы. На практике сформированные массивы характеристик вертикальной стратификации, как функции гидростатического давления, могут быть переданы потребителю после всплытия зонда каким-либо способом и использованы, например, для построения графиков соответствующих распределений.

На рис. 3–5 соответственно представлены результаты работы подсистемы оперативного анализа в виде профиля плотности морской воды, а также распределений вертикальной устойчивости и частоты Вэйсяля-Брента относительно гидростатического давления.

**Заключение.** Комплексирование гидростатического способа [6] и динамического метода [4] измерения плотности морской воды делает возможным разработку и создание зонда – профилографа для построения характеристик вертикальной стратификации океанской

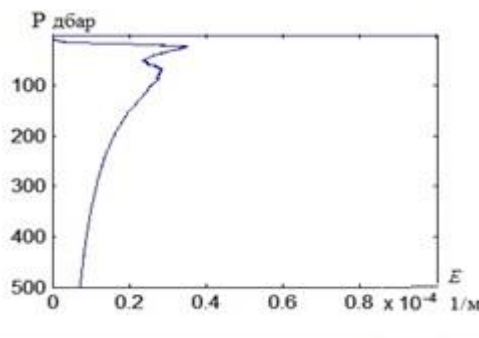


Рис. 3. Профиль плотности морской воды  
Fig. 3. Seawater density profile

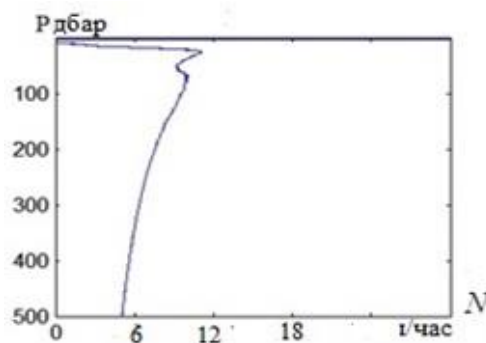


Рис. 4. Распределение вертикальной устойчивости вод  
Fig. 4. Vertical stability distribution of the water

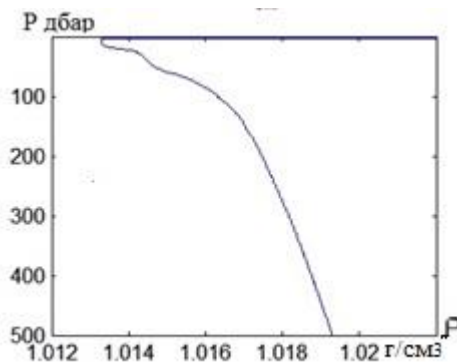


Рис. 5. Распределение частоты Вэйсяля-Брента  
Fig. 5. Väisälä-Brunt frequency distribution

среды [7] в виде цифровых массивов в режиме, близком реальному времени, что отвечает требованиям оперативного анализа океанской среды.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института природно-технических систем (№ государственной регистрации 121122300070-9).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров К.Н. Тонкая термохалинная структура вод океана. Л. Гидрометеиздат. 1976. 184 с.

2. 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.

3. Краснодубец Л.А. Метод определения вертикального профиля плотности морской воды на основе измерений параметров движения неуправляемого автономного зонда // Системы контроля окружающей среды. 2017. № 4 (30). С. 8–15.

4. Краснодубец Л.А. Динамические измерения в задачах оперативной океанологии при исследовании свойств океанской толщи // Системы контроля окружающей среды. 2022. № 1 (47). С. 56–65.

5. Мамаев О.И. Морская турбулентность. М.: Изд-во МГУ. 1970. 204 с.

6. Гайский В.А. Патент на изобретение РФ № 2792263. Измеритель плотности жидкости и его варианты: заявитель и патентообладатель: ФГБНУ «Институт природно-технических систем». Опубл. 21.03.2023. Бюл. № 9.

7. Millard R.C., Owens W.B., Fofonoff N.P. On the calculation of the Brunt-Vaisala frequency. *Deep Sea Research*. 1990. V. 37. No. 1. P. 167–181.

#### A NEW APPROACH TO SOLVING THE PROBLEMS OF OPERATIONAL ANALYSIS OF THE VERTICAL STRATIFICATION STATE OF OCEAN ENVIRONMENT WATERS

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

A solution to the problems of operational analysis of the vertical stratification state of the ocean environment using both a new hydrostatic method for direct measuring the density of natural waters patented by V.F. Gaisky and an updated original method for dynamic measurements of the vertical profile of the density of seawater using a marine profiling probe is presented. The results of computer modeling are given in the form of graphs of distributions of the main characteristics of stratification relative to hydrostatic pressure - the density of seawater, the vertical stability of layers of water masses and the Väisälä-Brunt frequency of thermohaline oscillations of deep waves.

Keywords: stratification, vertical stability, Väisälä-Brunt frequency, sea probe, seawater density, computer modeling, hydrostatic pressure.

#### REFERENCES

1. Fedorov K.N. Tonkaya termokhalinnaya struktura vod okeana (Fine thermohaline structure of ocean waters). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976, 184 p.

2. Arkhipkin V.S. and Dobrolyubov S.A. Okeanologiya. Fizicheskie svoystva morskoy vody (Physical properties of seawater). Moscow: Izd-vo Yurayt, 2020, 216 p.

3. Krasnodubets L.A. Metod opredeleniya vertikal'nogo profilya plotnosti morskoy vody na osnove izmerenij parametrov dvizheniya neupravlyayemogo avtonomnogo zonda (Method for determining the vertical profile of seawater density based on measurements of the motion parameters of an uncontrolled autonomous probe). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2017, No. 4 (30), pp. 8–15.



4. *Krasnodubets L.A.* Dinamicheskiye izmereniya v zadachah operativnoj okeanologii pri issledovanii svoystv okeanskoj tolshchi (Dynamic measurements in problems of operational oceanology when studying the properties of the ocean strata). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2022, Vol. 1 (47), pp. 56–65.

5. *Mamayev O.I.* Morskaya turbulentnost' (Marine turbulence). Moscow: Izd-vo MGU, 1970, 204 p.

6. *Gayskiy V.A.* Patent na izobretenie RF № 2792263. Izmeritel' plotnosti zhidkosti i ego varianty: zayavitel' i patentoobladatel': FGBNU "Institut prirodno-tekhnicheskikh sistem". Opubl. 21.03.2023. Byul. № 9 (Patent for invention of the Russian Federation No. 2792263. Liquid density meter and its variants: applicant and patent holder: Federal State Budgetary Institution "Institute of Natural-Technical Systems". Publ. 03/21/2023. Bull. No. 9).

7. *Millard R.C., Owens W.B., and Fofonoff N.P.* On the calculation of the Brunt-Vaisala frequency. *Deep Sea Research*, 1990, Vol. 37, No. 1, pp. 167–181.