

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ
ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАДИЕНТА ИЗМЕРЯЕМОГО ПАРАМЕТРА**

Е.О. Савкова¹, О.В. Ченгарь

¹Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет (г. Донецк)», г. Донецк, ул. Артема, 58

E-mail: helen-savkova@rambler.ru

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: OVChengar@sevsu.ru

В статье проанализирована работа измерительной системы мониторинга гидрофизических полей водной среды при выборе плана вертикального зондирования, основанного на вычислении размера термоклина и глубины залегания нижнего слабоградиентного слоя и использовании алгоритма определения турбулентных всплесков по превышению градиента измеряемых данных некоторого квазинулевого уровня.

Ключевые слова: мониторинг гидрофизических полей, градиент измеряемого параметра, слабоградиентный слой, термоклин, квазиоднородный слой, вертикальный профиль температуры.

Актуальность. Мировой Океан оказывает существенное влияние на жизнедеятельность человечества. И сегодня, как никогда ранее, ясна необходимость исследований водной среды для получения информации, определяющей это влияние. В свою очередь, организация морских научно-исследовательских экспедиций – это дорогостоящее мероприятие, требующее скрупулезной подготовки измерительных систем и планирования экспериментов. Одним из направлений океанских исследований является изучение тонкой структуры гидрофизических полей водной среды, а именно получение вертикальных профилей различных гидрофизических параметров с учетом наличия в исследуемых слоях турбулентных всплесков разных масштабов.

Выяснение причин и механизмов возникновения турбулентности окончательно не выяснены. Поэтому необходимы регулярные исследования этого явления, что, в свою очередь, требует накопления огромных экспериментальных данных, на базе которых можно было бы проводить необходимые исследо-

вания всех проблем, связанных с природой возникновения турбулентных неоднородностей.

Постановка задачи. Для структурно-алгоритмической организации измерительной системы гидрофизических параметров необходимо:

- использование математических моделей параметров распределения тонкой структуры гидрофизических полей [1–3];

- определение оптимальной конфигурации измерительной системы [4–6] на основе объектно-эволюционной модели [7];

- разработка алгоритмов вертикального зондирования [8, 9], что позволит подготовить данные для расчета скорости перемещения зондирующего устройства по глубине и определения дискретности опроса измерителей в зависимости от структуры слоя.

Имеется два варианта подготовки этих данных:

1. Моделирование вертикальной структуры турбулизированных слоев, что позволяет получить информацию о

толщине слоя и глубине его залегания [8].

2. Вычисление размера термоклина и глубины залегания нижнего слабоградиентного слоя и использования алгоритма определения турбулентных всплесков по превышению градиента измеряемых данных некоторого квази-нулевого уровня в процессе зондирования.

Решение поставленной задачи. В работе [4] было рассмотрено определение конфигурации системы мониторинга тонкой структуры гидрофизических полей с использованием первого варианта. Полученная конфигурация измерительной системы удовлетворяет выбранному критерию эффективности, т.е. включает оборудование минимальной стоимости, позволяющее провести исследование с минимальными затратами времени. При этом погрешность полученных результатов не превышает заданное пороговое значение 5%. Моделирование распределения турбулизованных прослоек [2] выполнено на основе вертикальных профилей температуры и вертикальных распределений турбулизованных слоев по глубине для района Черного моря в августе месяца.

При использовании второго варианта плана проведения мониторинга из базы данных извлекается информация о значениях квази-нулевого уровня параметра температуры для трех характерных участков вертикального профиля (квази-однородный слой, термоклин и слабо-градиентный однородный слой).

С помощью математических моделей [10] определяется толщина квазиоднородного слоя и термоклина:

$$\theta = \frac{T_s(t) - T(\eta)}{T_s(t) - T_H}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{Z - h(t)}{H - h(t)}, \quad (2)$$

где θ и η – безразмерные переменные, описывающие распределение температуры в сезонном термоклине; t – время; T_H – температура воды на нижней грани-

це деятельного слоя; $T_s(t)$ – температура на поверхности; $T(\eta)$ – температура на глубине η ; $h(t)$ – толщина квазиоднородного слоя; Z – вертикальная координата, направленная вглубь океана; H – толщина деятельного слоя.

При этом толщина квазиоднородного слоя h меняется с течением времени по закону

$$h(t) = H - (H - h_0) \left(\frac{T_s - T_H}{T_{s_0} - T_H} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}, \quad (3)$$

где

$$\alpha = \int_0^1 \theta(\eta) d\eta, \quad T_{s_0} = T_s(0), \quad h_0 = h(0).$$

Исходя из предположения, что сезонный термоклин заканчивается на нижней границе деятельного слоя H [10] из (3) получено выражение для вычисления толщины термоклина

$$ht(t) = (H - h_0) \left(\frac{T_s - T_H}{T_{s_0} - T_H} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}. \quad (4)$$

Эти данные используются для определения типа слоя, в котором проводятся текущие измерения в процессе зондирования.

Наличие нескольких однотипных измерительных датчиков [6], размещенных на фиксированном расстоянии друг от друга, позволяют определять градиент параметра в процессе зондирования с использованием выражения

$$\frac{dT}{dr} = \frac{T_2 - T_1}{\Delta r}, \quad (5)$$

где T_1 и T_2 – значения параметра температуры, полученные первым и вторым датчиками соответственно; Δr – расстояние между датчиками на гребенке.

Модуль полученного на каждом шаге измерений градиента сравнивается с пороговым значением соответствующего участка зондирования. Превышение

означает наличие турбулентных всплесков.

Моделирование с использованием второго плана зондирования для сравнения было выполнено на тех же вертикальных профилях, которые использовались для исследования конфигурации измерительной системы в работе [6]. Для акватории Черного моря в период августа средняя глубина залегания термоклина составляет порядка 10 м, квазиоднородный слой начинается приблизительно на глубине 60–70 м. Пороговые значения градиентов для каждого из участков составляют соответственно 0,125; 1,5 и 0,0125 °C/м [11]. В результате моделирования погрешность измерений составила 3,14%. Повышение точности измерений объясняется тем, что выражения для расчета глубины залегания термоклина и квазиоднородного слоя вносят меньшую погрешность, чем модель распределения турбулизованных слоев по глубине.

На рис. 1 приведены вертикальные профили температуры: исходный и по-

лученные в результате моделирования процесса зондирования с использованием первого и второго планов проведения эксперимента.

График полного профиля не позволяет отследить отличия реального профиля от измеренного, поэтому приведены фрагменты для каждого из участков: слабоградиентного приповерхностного слоя, термоклина и квазиоднородного слоя (рис. 2–4).

Анализ графиков позволяет объяснить несущественное уменьшение погрешности измерений при использовании различных планов проведения зондирования: если в одном участке методика позволяет отследить всплески параметра, то в другом месте профиля данные сглаживаются. Разработанная система мониторинга предназначена для исследования тонкой структуры гидрофизических полей, то есть должна предоставлять такую информацию, которая позволила бы определить положение и размеры τ -слоев.

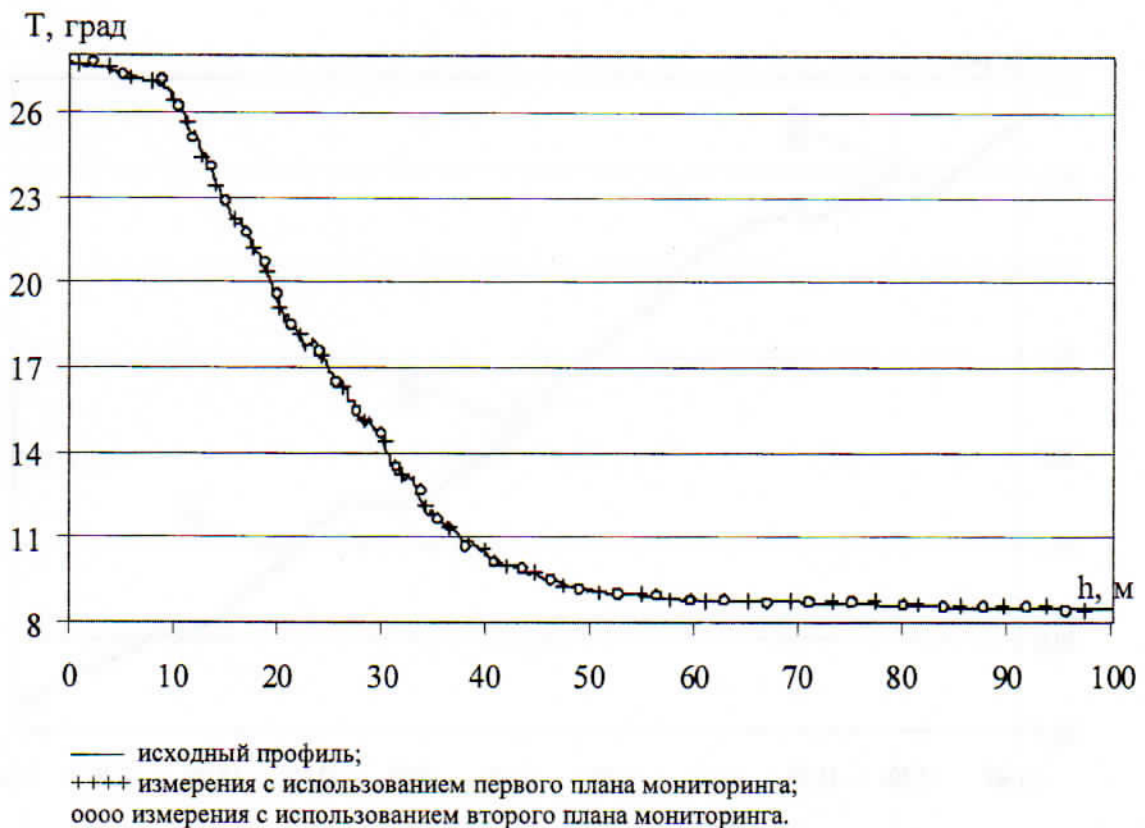


Рис. 1. Вертикальные профили температуры, полученные для Черного моря в августе месяце

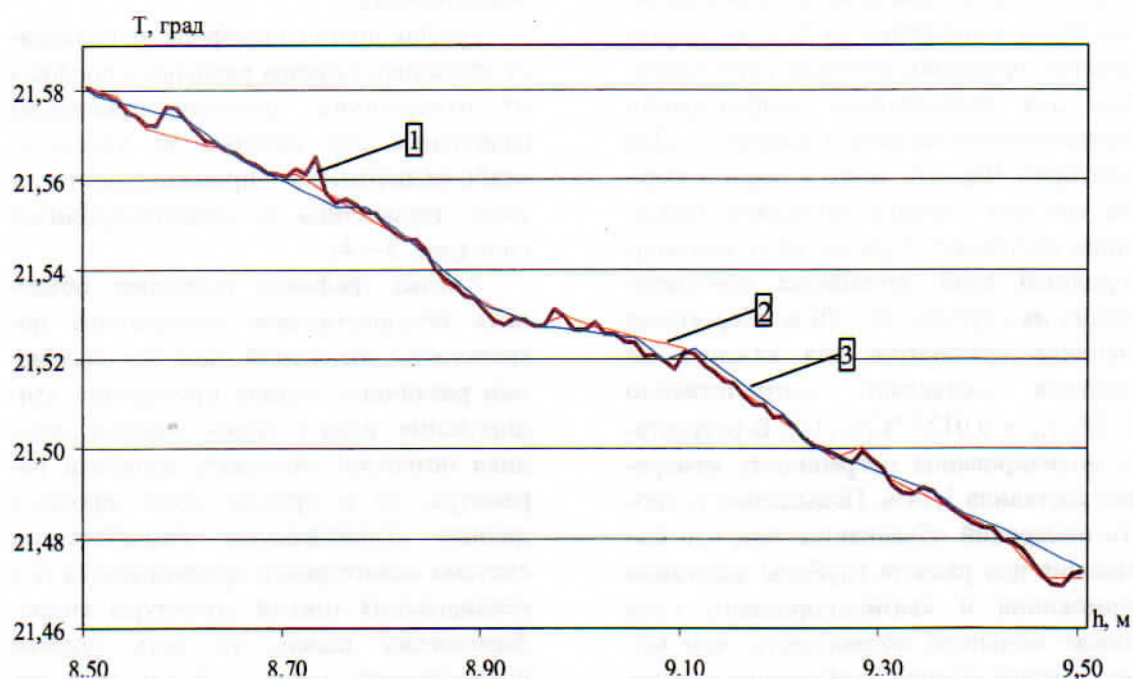


Рис. 2. Вертикальные профили температуры на слабоградиентном участке:
 1 – исходный профиль; 2 – моделирование по сценарию 1; 3 – моделирование по сценарию 2

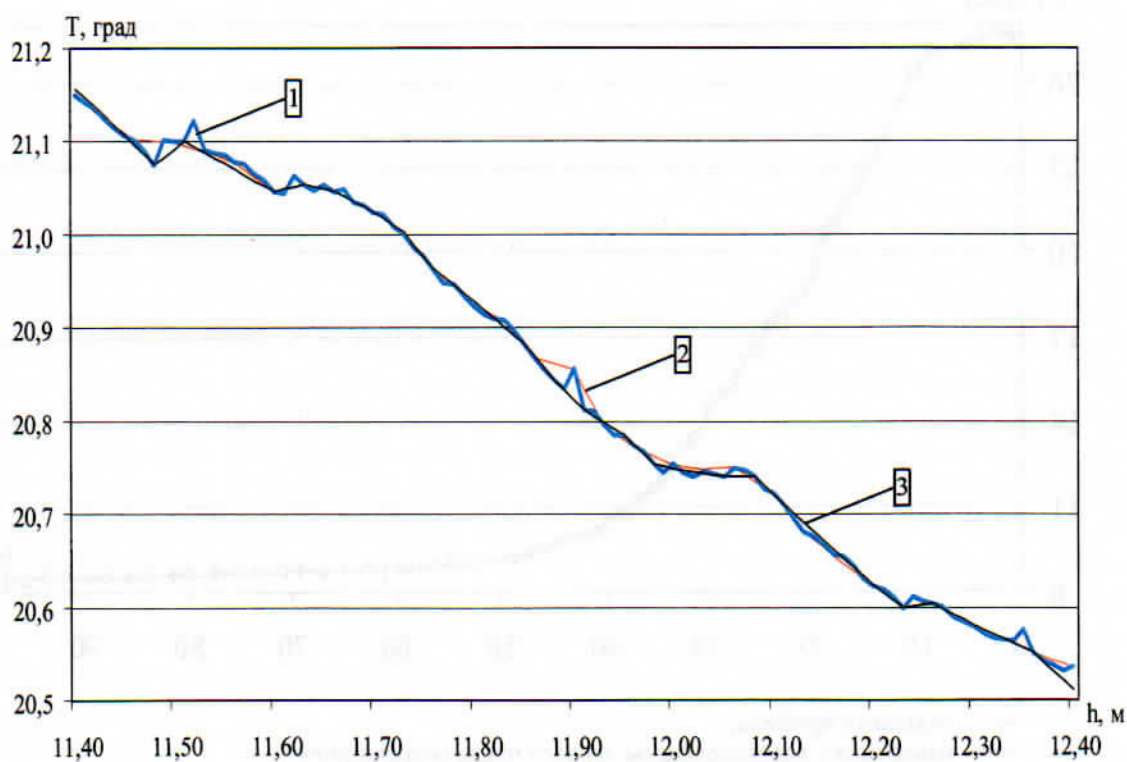


Рис. 3. Вертикальные профили температуры в термоклине:
 1 – исходный профиль; 2 – моделирование по сценарию 1; 3 – моделирование по сценарию 2

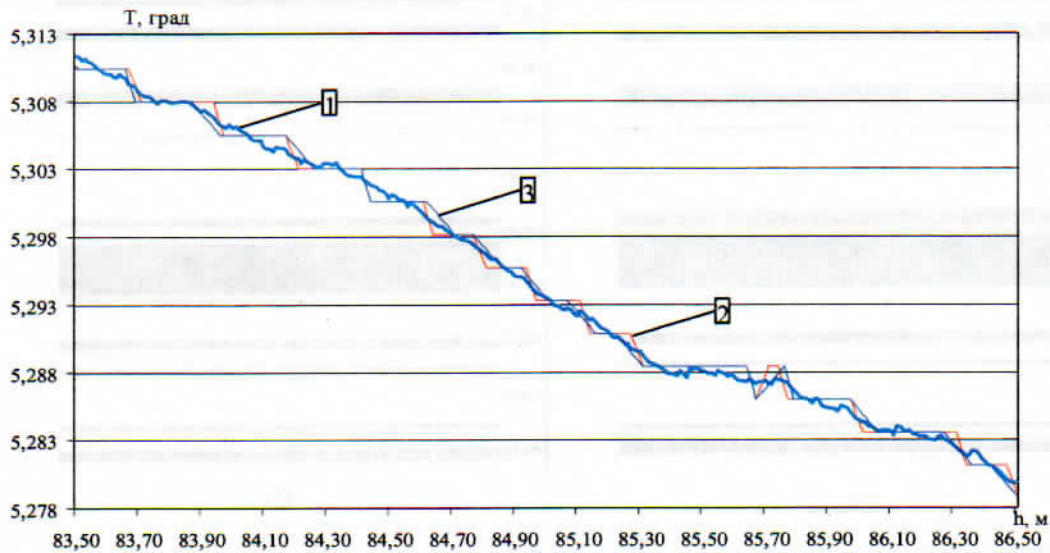


Рис. 4. Вертикальные профили температуры в квазиоднородном слое: 1 – исходный профиль; 2 – моделирование по сценарию 1; 3 – моделирование по сценарию 2

На рис. 5 и 6 приведены вертикальные структуры турбулизированных слоев по глубине, построенные по исходному профилю и на основании данных моделирования процесса измерений с использованием двух различных планов проведения экспериментов, для чего использовалась методика выделения τ -слоев, предложенная в [2]. Графики демонстрируют совпадение вертикальных структур τ -слоев исходного профиля и результатов моделирования с использованием второго плана (см. рис. 6), что объясняется настройкой процесса зонди-

рования в реальном масштабе времени по измерениям на предыдущем шаге. Сравнение вертикальных структур τ -слоев на рис. 5 показывает их расхождение, поскольку выбор частоты опроса датчиков производился на основании модели геометрических параметров турбулизированных слоев. Это повлияло на определение толщины слоя, которая получилась несколько меньше реальных размеров из-за неточного определения разрешения опроса датчиков по глубине.

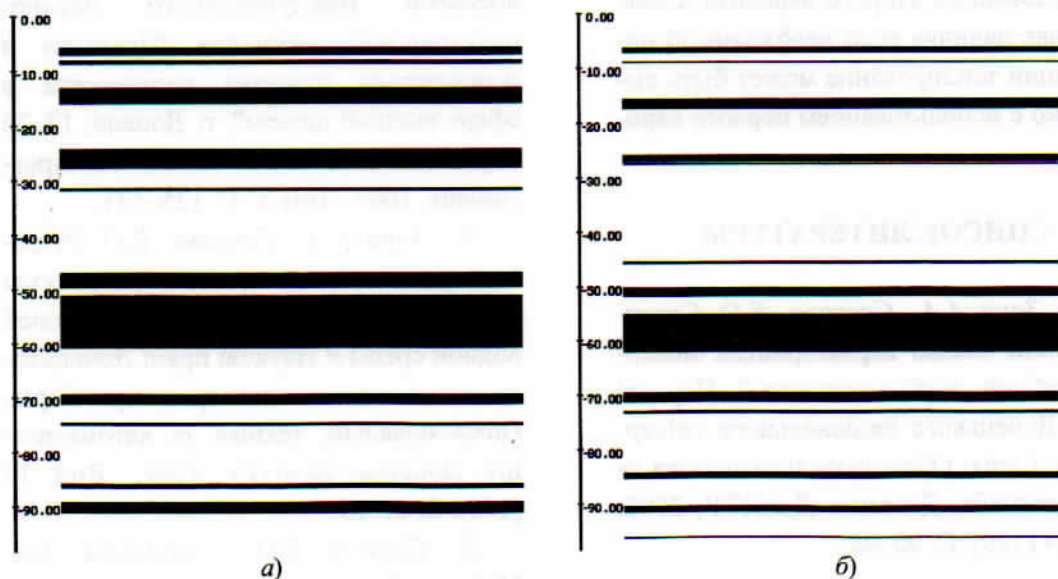


Рис. 5. Вертикальные структуры распределения турбулизированных слоев по глубине: а – исходный профиль; б – результат зондирования с использованием модели вертикальной структуры τ -слоев

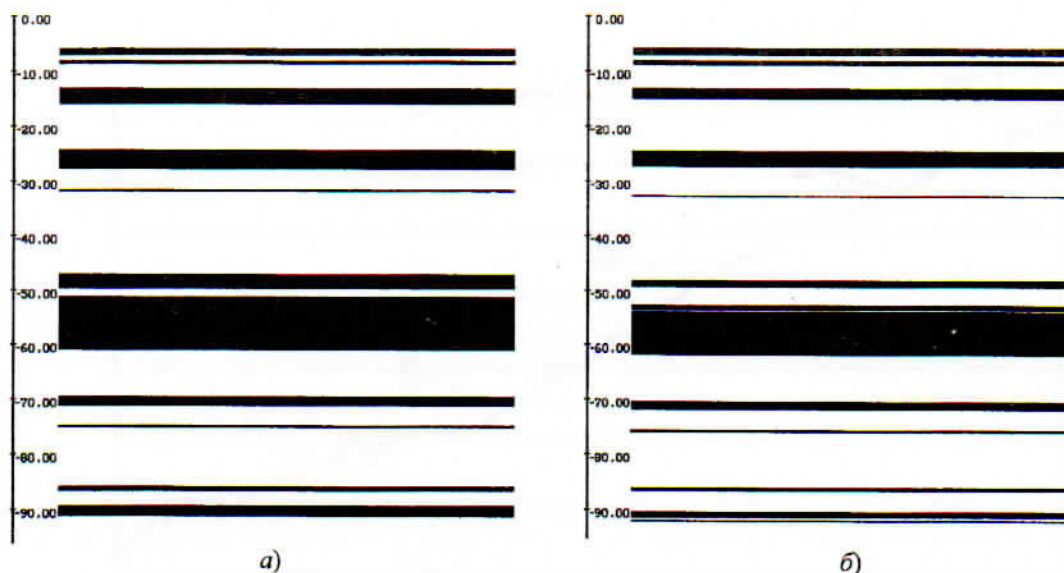


Рис. 6. Вертикальные структуры распределения турбулизированных слоев по глубине: *а* – исходный профиль; *б* – результат зондирования с использованием градиента измеряемого параметра

Заключение. Выполненный анализ позволяет сделать вывод о том, что при проведении вертикального зондирования в реальном масштабе времени можно использовать любой из предлагаемых планов проведения эксперимента. Выбор определяется исследователем на основании имеющихся данных о предыдущих зондированиях и, в случае отсутствия информации о распределении турбулизированных слоев по глубине, зондирование необходимо выполнять только с использованием второго варианта плана. В случае наличия всей необходимой информации зондирование может быть выполнено с использованием первого варианта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зори А.А., Савкова Е.О. Статистический анализ характеристик мелко-масштабной турбулентности // Наукові праці Донецького національного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Донецьк: ДонНТУ, 2008. Вип. 14 (129). С. 90–96.

2. Зори А.А., Савкова Е.О. Использование имитационного моделирования для определения характеристик мелко-масштабной турбулентности // Наукові праці Донецького національного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Донецьк: ДонНТУ, 2004. Вип. 74. С. 326–331.

3. Зори А.А., Савкова Е.О. Итерационная математическая модель параметров распределения тонкой структуры гидрофизических полей // Материалы восьмого международного научно-практического семинара “Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы”, г. Донецк, 17–20 апреля 2007 г. В 3-х томах. Таганрог-Донецк, 2007. Том 3. С. 125–131.

4. Зори А.А., Савкова Е.О. Разработка компьютеризированной системы мониторинга гидрофизических полей водной среды // Наукові праці Донецького національного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Донецьк: ДонНТУ, 2009. Вип. 17 (148). С. 81–89.

5. Савкова Е.О., Шумаева Е.А. Метод выбора конфигурации систем мо-

нитинга гидрофизических параметров водной среды // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Проблеми моделювання та автоматизації проектування" (МАП-2011). Донецьк: ДонНТУ. 2011. Вип. 9 (179). С. 225–230.

6. Савкова Е.О., Ченгарь О.В. Определение структуры компьютеризированной системы мониторинга неоднородностей гидрофизических полей водной среды // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: 2016. Вип. 3 (23). С. 11–19.

7. Савкова Е.О., Светличная В.А. Объектно-эволюционная модель системы мониторинга гидрофизических полей водной среды // Наукові праці Донецького національного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Донецьк: ДонНТУ, 2010. Вип. 19 (171). С. 19–26.

8. Зори А.А., Савкова Е.О. Разработка стратегии вертикального зондиро-

вания с использованием математических моделей мелкомасштабных турбулизированных прослоек // Наукові праці Донецького національного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Донецьк: ДонНТУ, 2007. Вип. 13 (121). С. 166–173.

9. Савкова Е.О. Имитационное моделирование процесса вертикального зондирования гидрофизических полей водной среды // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. ХАРКІВ: НТУ «ХП», 2010. № 31. С. 162–169.

10. Зори А.А., Коренев В.Д., Хламов М.Г. Методы, средства, системы измерения и контроля параметров водных сред. Донецк: РИА ДонГТУ, 2000. 388 с.

11. Поздынин В.Д. Мелкомасштабная турбулентность в океане. М.: Наука, 2002. 202 с.

STUDY OF OPERATION OF MEASURING SYSTEM MONITORING WHEN PROBING THE FINE STRUCTURE HYDROPHYSICAL FIELDS WITH A GRADIENT OF THE MEASURED PARAMETER

E.O. Savkova¹, O.V. Chengar

¹State Higher Education Institution «Donetsk National Technical University», Donetsk, Artem St., 58

Federal Public Autonomous Educational Institution of the Higher Education «Sevastopol State University», Russian Federation, Sevastopol, University St., 33

The article analyzes the work of measuring system for monitoring of hydrophysical fields of the aquatic environment when choosing a plan for vertical probing based on the calculation of the thermocline size and depth of the lower weakly-gradient layer and algorithm is used the definition of turbulent bursts on exceeding the gradient of the measured data of a zero level.

Keywords: monitoring of hydrophysical fields, the gradient of the measured parameter, weakly-gradient layer, thermocline, mixed layer, the vertical temperature profile.