

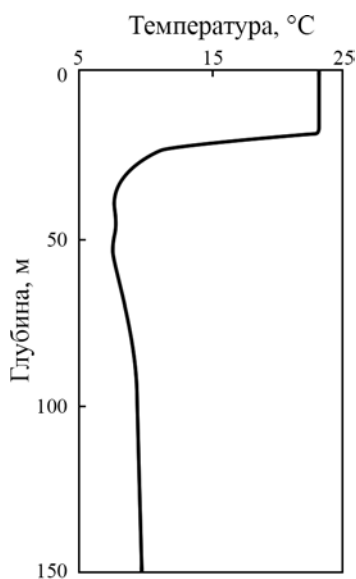
Е.А. Акимов, А.Б. Полонский, С.В. Станичный

Параметризация вертикального профиля температуры в сезонном термоклине Черного моря

На основе натуральных данных исследовались осредненные безразмерные профили температуры в сезонном термоклине Черного моря за период с середины июня по конец октября. Установлено, что «мгновенные» профили группируются вокруг осредненных среднемесячных кривых со среднеквадратической погрешностью менее 10%. Предложены аппроксимационные формулы, описывающие зависимость безразмерного профиля температуры в термоклине от его толщины и безразмерной глубины.

Ключевые слова: сезонный термоклин, Черное море, параметрическое описание профиля температуры.

Введение. Данные наблюдений показывают, что вертикальная термическая структура вод Черного моря претерпевает значительные изменения в течение года. С июня по декабрь температурный профиль от поверхности до горизонта 200 м, как правило, можно разделить на верхний квазиизотермический слой (ВКС), в котором температура слабо меняется с глубиной, сезонный термоклин (СТ), характеризующийся большими вертикальными градиентами температуры, холодный промежуточный слой (ХПС), температура которого около 8°C , и главный термоклин (ГТ) с медленно растущей с глубиной температурой (рис. 1). Зимой в процессе конвективного перемешивания верхнего слоя моря происходит интенсивное вовлечение холодных вод СТ в ВКС, который быстро заглубляется. К середине зимы СТ исчезает, а ВКС достигает ХПС. Вертикальную термическую структуру вод в этот период можно разделить на ВКС и ГТ. С марта по май происходит процесс формирования СТ [1].



Р и с. 1. Пример профиля температуры в Черном море (август 1993 г.)

Наличие хорошо перемешанного ВКС позволяет успешно применять для расчета и прогноза его характеристик так называемые интегральные модели. В рамках этих моделей температура ВКС рассчитывается по проинтегрированному по вертикали уравнению турбулентной теплопроводности, причем предполагается, что температура в ВКС постоянна по глубине. Глубина ВКС вычисляется по уравнению баланса турбулентной энергии.

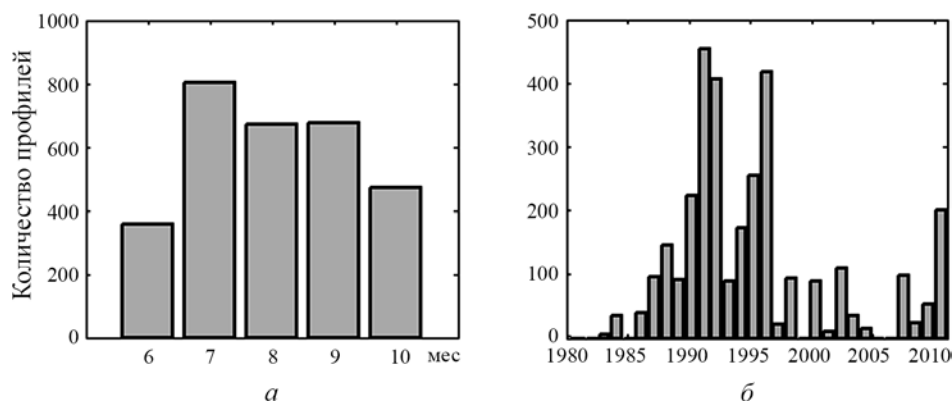
Для замыкания задачи расчета и прогноза температуры и толщины ВКС необходимо

определить величины потоков тепла на верхней и нижней границах этого слоя. Первый из них (поток тепла на поверхности) является граничным условием, а поток тепла на нижней границе перемешанного слоя представляет собой одну из переменных, рассчитываемых в ходе решения задачи. При интенсивном турбулентном вовлечении вод СТ в ВКС (в процессе штормового перемешивания в летне-осенний период или при резком понижении температуры воздуха в начале зимы) этот поток тепла зависит главным образом от скорости заглубления ВКС и скачка температуры у его основания и оценивается из соотношения Крауса – Тернера [2]. При медленной эволюции ВКС, когда в течение достаточно длительного периода (порядка сезона) отсутствуют резкие изменения граничных условий на поверхности, поток тепла на нижней границе ВКС определяется диффузионными потоками в СТ. Эти потоки можно рассчитать, зная профиль температуры и величину эффективного коэффициента вертикального турбулентного обмена в СТ [2 – 4].

Таким образом, для расчета и прогноза характеристик ВКС необходимо знать вертикальный профиль температуры в СТ. Один из методов получения такого профиля основывается на предположении Китайгородского – Миропольского об универсальности распределения безразмерной температуры в СТ, что позволяет использовать параметрическую зависимость этой температуры от безразмерной глубины [5, 6]. Параметризация вертикальной термической структуры в СТ дает возможность рассчитать поток тепла на нижней границе ВКС и замкнуть задачу об определении характеристик перемешанного слоя в рамках интегральных моделей. Для Черноморского региона справедливость подобной параметризации не проверялась. Правда, в работе [7] использовалась аналитическая параметризация профиля температуры в черноморском СТ, полученная в предположении о полиномиальном распределении температуры под ВКС. Однако эта параметризация не верифицировалась.

Задачей данной работы является уточнение параметризации вертикального профиля температуры в СТ Черного моря на основе большого объема экспериментальных данных, накопленных в региональном банке данных Морского гидрофизического института (МГИ) НАН Украины.

Используемые данные. В работе рассматривались профили температуры, полученные по данным измерений с дискретностью по глубине 1 м и менее за 1983 – 2011 гг. для Черного моря, хранящиеся в банке данных МГИ [8].



Р и с. 2. Распределение используемых данных по месяцам и годам

Исследовался период года с 15 июня по 31 октября, когда СТ выражен наиболее четко [1]. Общее количество анализируемых профилей 3190. Распределение используемых данных по месяцам и годам приведено на рис. 2.

Методика обработки данных и результаты. С.А. Китайгородский и Ю.З. Миропольский предложили изучать профили температуры не в обычных, декартовых, координатах, а в безразмерной форме. Их идея состояла в том, что профили безразмерной температуры в СТ в безразмерных координатах характеризуются универсальностью и могут быть описаны достаточно простыми параметрическими соотношениями. В их работе [5], а также в ряде других работ [6, 9] профили температуры приводились к безразмерной форме при помощи следующих соотношений:

$$\theta = \frac{T_0 - T(z)}{T_0 - T_H}, \quad (1)$$

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

где η – безразмерная глубина; θ – безразмерная температура; z – вертикальная координата, направленная вглубь океана; h – глубина верхней границы СТ; H – глубина нижней границы СТ; T – температура, T_0 – температура на верхней границе СТ, T_H – температура на нижней границе СТ.

В более поздних интегральных моделях [10, 11] использовалось другое выражение для безразмерной температуры:

$$\theta = \frac{T(z) - T_H}{T_0 - T_H}. \quad (3)$$

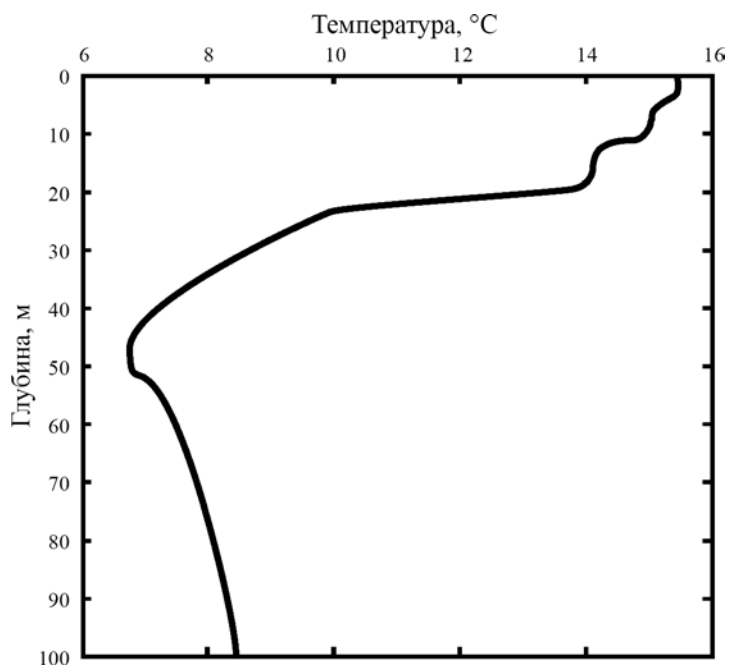
Между представлениями (3) и (1) нет никакой принципиальной разницы. В данной работе мы использовали выражение (3), так как оно является, по нашему мнению, более наглядным.

Границы СТ в Мировом океане обычно определяют по градиентному критерию, задавая значения вертикального градиента температуры, характеризующие СТ [12]. Этот подход основан на том, что градиент температуры в ВКС и ГТ на один-два порядка меньше, чем в СТ. Однако определение величины критического значения вертикального градиента температуры для выделения границ СТ является не тривиальной задачей.

В Черном море нижняя граница СТ совпадает с верхней границей ХПС [1]. Это облегчает задачу ее выделения. Действительно, за нижнюю границу СТ в Черном море естественно принять глубину залегания (верхней) изотермы 8°C, традиционно используемой в качестве критерия для выделения верхней границы ХПС. Что касается верхней границы СТ, то для ее выделения использовался градиентный критерий. Причем критическое значение градиента температуры, при достижении которого часть вертикального профиля относилась к области СТ, рассчитывалось отдельно для каждого месяца. Это значение вычислялось как величина на порядок меньшая среднего по всем профилям максимального градиента температуры для данного месяца. Такой

критерий основывается на известном из литературы факте о росте на порядок величины вертикального градиента температуры в Черном море от верхней границы СТ к области максимальных градиентов [13]. Значения критического градиента для каждого месяца равны: июнь – 0,2 К/м, июль – 0,27 К/м, август – 0,28 К/м, сентябрь – 0,29 К/м, октябрь – 0,29 К/м. Как показали тестовые расчеты, этот метод выделения верхней границы СТ дает результаты, близкие к полученным по традиционно используемым методам определения нижней границы ВКС (практически совпадающей с верхней границей СТ при рассмотрении сглаженного профиля температуры) [3, 11]. Вместе с тем он (при учете дополнительного условия, указанного ниже) позволяет упростить обработку большого массива зондирований, поскольку в этом случае отпадает необходимость в дополнительном сглаживании «мгновенных» профилей температуры.

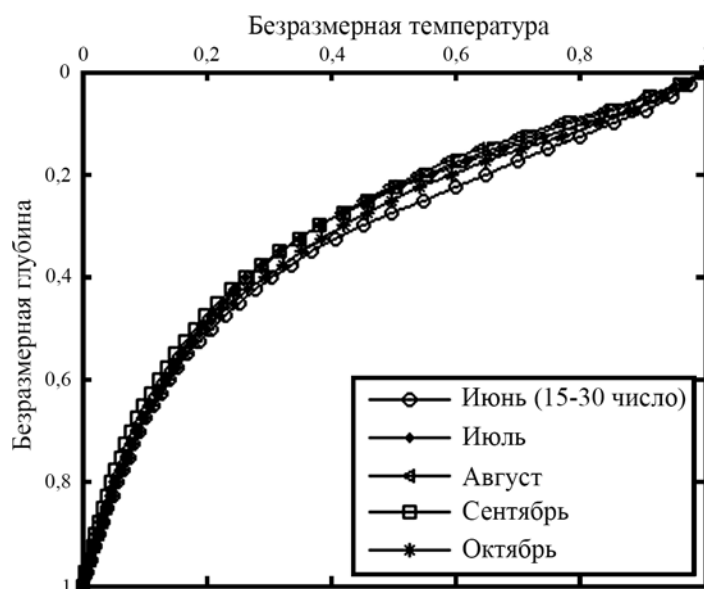
Отметим, что описанный метод сам по себе не всегда дает возможность однозначного определения верхней границы СТ (так же, как и другие методы). Достаточно часто суточные колебания баланса тепла на поверхности моря приводят к возникновению суточного термоклина. При этом могут возникать один или даже несколько промежуточных термоклин, которые формально неотличимы от СТ (см. рис. 3 и [12]). Решение данной проблемы, использованное в настоящей работе, основано на том, что перепад температуры в суточном термоклине значительно меньше перепада температуры в СТ [14]. Поэтому за границу СТ принималась верхняя граница интервала глубин с наибольшим перепадом температуры.



Р и с. 3. Пример профиля температуры в Черном море с суточным термоклином (июнь 1990 г.)

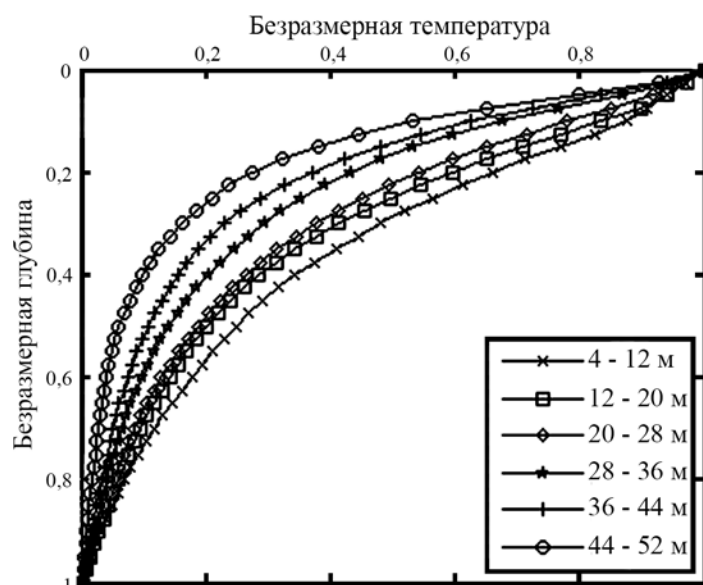
После выделения СТ и приведения его к безразмерному виду каждый безразмерный профиль интерполировался с шагом $2,5 \cdot 10^{-2}$ по глубине, что примерно соответствует 1 м, т. е. дискретности используемых данных.

При получении среднемесячных безразмерных профилей (БП) выполнялась группировка данных по месяцам и их осреднение по каждому горизонту, что позволило оценить временную изменчивость сезонного масштаба. Для каждой глубины рассчитывалось среднеквадратическое отклонение (СКО) значений температуры от средней температуры для данного месяца. Это позволило выявить типичные отклонения «мгновенных» профилей от среднемесячных (за исключением июня, для которого исследовался полумесячный интервал – см. раздел «Используемые данные»). При анализе полученных результатов было установлено, что форма осредненного по всему Черному морю БП с июня по октябрь не претерпевает существенных изменений (рис. 4). Среднее по глубине СКО составляет $\approx 9\%$ для всех месяцев. Это значит, что «мгновенные» БП достаточно хорошо группируются вокруг среднемесячных. Таким образом, средний БП для всех месяцев можно описать одной зависимостью вида $\theta = \theta(\eta)$ с типичной погрешностью порядка 10%. Однако эту погрешность можно уменьшить.



Р и с. 4. Среднемесячные безразмерные профили температуры для Черного моря в период с 15 июня по конец октября

При обработке экспериментальных данных было установлено, что для периода с начала июля по конец сентября на форму среднего БП влияет толщина СТ, т. е. величина $h_T = H - h$. На рис. 5 представлена зависимость формы осредненного БП от величины h_T . СКО «мгновенных» профилей от осредненных кривых составляет около 7%. Учет данной зависимости улучшает точность параметризации профиля температуры в СТ.



Р и с. 5. Средние безразмерные профили температуры для Черного моря в период с начала июля по конец сентября (в правом нижнем углу представлены величины интервалов h_T , по которым проводилось осреднение)

Для июня и октября зависимость формы профиля от толщины СТ не выявлена. Средние профили для различных h_T очень плотно группируются вокруг среднемесячных кривых, а среднее СКО равно $\approx 9\%$.

Таким образом, период с июня по октябрь можно разделить на два (первый – июнь и октябрь, второй – с июля по сентябрь) и выполнить параметризацию профиля температуры в СТ вида $\theta = \theta(\eta)$ для первого периода и вида $\theta = \theta(\eta, h_T)$ – для второго.

Из рис. 4 и 5 видно, что можно получить параметризацию профиля температуры для каждого из периодов аппроксимацией средних БП сигмоидальной кривой. В результате процедуры подбора аппроксимирующей функции среди сигмоидальных (S -образных) кривых была выбрана логистическая функция, поскольку она является наиболее оптимальной при описании полученных зависимостей:

$$\theta(\eta) = 1/[1 + (\eta/a)^b]. \quad (4)$$

Средние БП для июня и октября были аппроксимированы одной функцией вида (4) с коэффициентами a и b , равными 0,27 и 2,2 соответственно. Коэффициент детерминации (доля дисперсии, описываемая данной аппроксимацией) равен 0,99.

Для получения зависимости вида $\theta = \theta(\eta, h_T)$ для периода с июля по сентябрь коэффициенты a и b в формуле (4) заменялись линейными функциями, зависящими от h_T :

$$a(h_T) = a_a + b_a h_T, \quad (5)$$

$$b(h_T) = a_b + b_b h_T. \quad (6)$$

Для обоснования выбора линейных аппроксимаций (5),(6) предварительно строились графики функциональных зависимостей $a(h_T)$ и $b(h_T)$. Они показали, что искомая связь с достаточной точностью описывается линейной функцией.

Тогда, подставляя соотношения (5) и (6) в формулу (4), получим аппроксимационную функцию вида

$$\theta(\eta, h_T) = 1 / \{ 1 + [\eta / (a_a + b_a h_T)]^{a_b + b_b h_T} \}. \quad (7)$$

Функция (7) была применена для аппроксимации данных, полученных для июля – сентября (рис. 5). Выбор вида функции $\theta(\eta, h_T)$ оказался удачным, поскольку коэффициент детерминации при описании средних БП равен 0,99. Получены следующие значения для коэффициентов в функции (7):

$$a_a = 3,254 \cdot 10^{-1}, \quad b_a = -4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1},$$

$$a_b = 2,25, \quad b_b = -1,22 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}.$$

Среднемесячные значения h_T для периода с 15 июня по 31 октября, осредненные по всему бассейну, составляют в июне – 18 м, июле – 28 м, августе – 23 м, сентябре – 25 м, октябре – 15 м.

Обсуждение результатов. Полученные параметризации позволяют описывать вертикальную термическую структуру вод в СТ Черного моря для периода с середины июня по октябрь. Применение зависимости $\theta = \theta(\eta, h_T)$ для июля – сентября позволило улучшить качество параметризации по сравнению с параметризацией вида $\theta = \theta(\eta)$. Типичная (среднеквадратическая) погрешность параметризации уменьшилась при этом на 2%.

Полученные параметризации могут использоваться не только для расчета характеристик ВКС по интегральным моделям, но и для восстановления средней вертикальной термической структуры в СТ по известным значениям H , h_T и T_0 . Значения H для Черного моря можно вычислить по климатическим данным (см., например, [15]), и таким образом считать стандартным параметром $H = H(x, y, t)$. Значения T_0 можно получить по спутниковым данным (например, по данным сенсоров *AVHRR*, *SEVIRI*). Глубина перемешанного слоя h в интегральных моделях сама по себе является рассчитываемым параметром и определяется в ходе решения задачи. Для восстановления профиля температуры в СТ без применения интегральных моделей ВКС можно воспользоваться различными эмпирическими или полуэмпирическими соот-

ношениями, связывающими глубину ВКС с внешними параметрами (такими как скорость ветра или потоки тепла на поверхности моря) [3, 16].

Заключение. Установлено, что форма безразмерного профиля температуры в сезонном термоклине Черного моря остается постоянной с середины июня по конец октября. Для периода с июля по сентябрь обнаружена зависимость формы осредненного безразмерного профиля от вертикального размера сезонного термоклина, что позволяет параметризовать этот профиль температуры в виде $\theta = \theta(\eta, h_T)$. Для октября и второй половины июня зависимость формы безразмерного профиля от температуры не выявлена. Среднемесячные профили за июнь и октябрь можно описать функцией вида $\theta = \theta(\eta)$.

Авторы выражают благодарность рецензенту А.С. Самодурову за обсуждение первого варианта работы и ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 239 с.
2. *Моделирование* и прогноз верхних слоев океана // Под ред. Э.Б. Крауса. Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – С. 175 – 208.
3. *Полонский А.Б.* Горизонтально-неоднородный деятельный слой океана и его моделирование. – Севастополь-Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1989. – 233 с.
4. *Самодуров А.С., Чухарев А.М.* Оценка интенсивности вертикального турбулентного обмена в верхнем слое Черного моря по данным измерений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – Вып. 14. – С. 524 – 529.
5. *Китайгородский С.А., Миропольский Ю.З.* К теории деятельного слоя открытого океана // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1970. – 6, № 2. – С. 178 – 188.
6. *Миропольский Ю.З., Филлюшкин Б.И., Чернышков П.П.* О параметрическом описании профилей температуры в деятельном слое океана // Океанология. – 1970. – 10, вып. 6. – С. 1101 – 1106.
7. *Васечкина Е.Ф.* Интегральная модель деятельного слоя Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 1985. – № 6. – С. 23 – 29.
8. *Развитие* морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / Под общ. ред. В.Н. Еремеева. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – 704 с.
9. *Нестеров Е.С., Калацкий В.И.* Параметризация вертикального профиля температуры воды в деятельном слое Северной Атлантики // Тр. ГМЦ СССР. – 1975. – Вып. 161. – С. 35 – 39.
10. *Арсеньев С.А., Фельзенбаум А.И.* Интегральная модель деятельного слоя океана // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1977. – 13, № 10. – С. 1034 – 1043.
11. *Калацкий В.И.* Моделирование вертикальной термической структуры деятельного слоя океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 213 с.
12. *Филлипс О.М.* Динамика верхнего слоя океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 319 с.
13. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – 212 с.

14. *Кудрявцев В.Н., Соловьев А.В.* Структура приповерхностного слоя океана в период дневного прогрева // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1989. – 25, № 5. – С. 524 – 534.
15. *Шокурова И.Г.* Долгопериодная изменчивость гидрологических полей и геострофических циркуляций в Черном море: Дис. ... канд. геогр. наук. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – 175 с.
16. *Абузяров З.К.* Прогноз толщины слоя волнового перемешивания // Тр. ГМЦ СССР. – 1975. – Вып. 161. – С. 63 – 70.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 18.12.12
После доработки 04.06.13

АНОТАЦІЯ На основі натурних даних досліджувалися осереднені безрозмірні профілі температури в сезонному термоклині Чорного моря за період з середини червня по кінець жовтня. Встановлено, що «миттєві» профілі групуються навколо осереднених середньомісячних кривих зі середньоквадратичною погрешністю менше 10%. Запропоновані апроксимаційні формули, які описують залежність безрозмірного профілю температури в термоклині від його товщини та безрозмірної глибини.

Ключові слова: сезонний термоклин, Чорне море, параметричний опис профілю температури.

ABSTRACT Averaged dimensionless temperature profiles in the Black Sea seasonal thermocline during the period from mid-June to late October are studied based on in situ data. It is found that «instantaneous» profiles group around the averaged monthly mean curves whose root-mean-square error is less than 10%. Approximation equations describing dependence of the dimensionless temperature profile in the thermocline upon its thickness and dimensionless depth are proposed.

Keywords: seasonal thermocline, Black Sea, parametric description of temperature profiles.