

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

СРИБЕРКО АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ

Прим. № \_\_\_\_  
УДК 551.465

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ТЕРМОХАЛИННА СТРУКТУРА ТА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ ЇЇ**  
**ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ В ДІЯЛЬНОМУ ШАРІ ЧОРНОГО МОРЯ**

103 Науки про Землю

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ А.В. Сриберко

Наукові керівники:

Тучковенко Юрій Степанович, доктор географічних наук, професор

Андріанова Ольга Радомирівна, доктор географічних наук, старший науковий співробітник

Одеса – 2023

## АНОТАЦІЯ

*Сриберко А.В.* Термохалинна структура та методика розрахунків її просторового розподілу в діяльному шарі Чорного моря. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 «Науки про Землю». – Одеський державний екологічний університет, Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2023.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової задачі щодо відновлення просторового розподілу термохалинних характеристик в діяльному шарі морського середовища на підставі результатів розрахунків їх вертикальних профілів за даними дистанційних вимірювань. На сьогодні для проведення досліджень у межах спеціальності 103 «Науки про Землю», зокрема в галузі морських наук, дуже відома проблема отримання контактних даних гідрофізичних, гідрохімічних та гідробіологічних параметрів Світового океану. Насамперед це пов'язано із відсутністю регулярних експедиційних досліджень морського середовища, зокрема в Чорному морі. Останнім часом, при проведенні океанологічних досліджень, у випадку відсутності контактних даних, застосовуються розрахункові значення для відновлення просторового розподілу гідрометеорологічних характеристик щодо подальшого їх аналізу та оцінки. Це заощаджує грошові та часові ресурси, які довелося б витратити на проведення експедиційних спостережень. Багато аспектів, пов'язаних з вивченням вертикальної термохалинної структури вод Чорного моря, її сезонною мінливістю, зараз вимагають більш глибокого вивчення, що викликається глобальними кліматичними змінами. Тому відновлення просторового розподілу гідрофізичних характеристик в Чорному морі є актуальною задачею, вирішення якої дає можливість встановлювати їх сучасні зміни в науково-дослідницьких та прикладних цілях в області гідрографії, гідроакустики, океанології, екології моря, судноплавстві та ін.

*Метою дисертаційної роботи є розробка науково обґрунтованої методики розрахунків вертикального розподілу термохалинних характеристик на основі дистанційних вимірювань для досліджень просторово-часової мінливості температури і солоності діяльного шару морського середовища та визначення ефективності її використання на прикладі глибоководної частини Чорного моря.*

У процесі досліджень були вирішені наступні задачі:

– дослідити особливості гідрофізичних процесів Чорного моря щодо визначення можливості його використання для тестування дистанційних методів контролю морського середовища та показати характеристики термохалинної структури й динамічних процесів чорноморського басейну на масштабах сезонної та міжрічної мінливості;

– побудувати рівняння регресії на підставі виявленої статистичної залежності між температурою води на сусідніх горизонтах в Чорному морі за осередненими даними температури води;

– розробити науково-методичне обґрунтування використання даних супутникових спостережень для розрахунків вертикального розподілу полів температури води, швидкості звуку та солоності у морському середовищі;

– провести чисельні експерименти щодо визначення критеріїв для розрахунків вертикального розподілу температури води за розробленою методикою;

– провести розрахунки вертикальних профілів термохалинних характеристик в діяльному шарі морського середовища за даними дистанційних вимірювань та на підставі отриманих результатів відновити просторовий їх розподіл;

– оцінити особливості просторово-часового розподілу термохалинних параметрів та швидкості звуку, що розраховані за розробленою методикою.

*Об'єктом дослідження був діяльний шар глибоководної акваторії Чорного моря. Предметом дослідження були термохалинна та гідроакустична структура вод, поля вертикального й горизонтального розподілу температури, солоності та швидкості звуку в морському середовищі.*

*Методи дослідження.* В дослідженнях використовувались математичні та фізико-статистичні методи аналізу, сучасні методи візуалізації результатів досліджень. Регресійний й кореляційний аналізи були основою для розробки методики.

Дослідження вертикального розподілу температури та солоності води в Чорному морі проводилися в глибоководній частині моря на стандартних горизонтах (0, 10, 20, 25, 30, 50 метрів) в період весна – осінь. Даний район досліджень представлений найбільшою кількістю вимірювань та входить в зону Основної Чорноморської течії.

З найголовніших результатів дисертаційної роботи, отриманих особисто автором, слід відмітити наступне.

Вперше визначені експериментально обчислені критерії для розрахунків вертикального розподілу температури води за розробленою методикою. Для покращення точності результатів розрахунків вертикального профілю температури води було визначено спеціальні поправки. Поправки вводяться на горизонтах 10, 20, 25 метрів в період весна – літо, а восени – на горизонтах 10, 20, 25, 50 метрів.

Запропоновано розроблені автором методики розрахунків гідрофізичних характеристик у глибоководній акваторії Чорного моря в шарі 0 – 50 метрів в період весна – осінь:

- нова методика розрахунку вертикального розподілу полів температури води на основі супутникової інформації з урахуванням критеріїв та поправок на температуру води;
- методика для розрахунку вертикального розподілу полів швидкості звуку на основі супутникової інформації;
- методика для розрахунку вертикального розподілу полів солоності води за даними дистанційних вимірювань.

Розроблені та апробовані на прикладі Чорного моря програмні модулі автоматичного використання супутникової інформації для розрахунків вертикального розподілу полів температури води та швидкості звуку у

морському середовищі. Вихідними даними для розрахунків є тільки щоденні супутникові дані температури поверхні моря.

Автором встановлено, що на підставі фактичних даних станційних, судових вимірювань та поплаців Арго за двадцятирічний період з 1999 – 2018 рр. в середньому середньоквадратичне відхилення значень у локальному, тобто в конкретно узятій точці та в певний момент часу, вертикальному розподілі солоності у глибоководній частині Чорного моря в шарі 0 – 50 метрів в період весна – осінь, було порядку 0,24‰. Для достатньо високої апроксимації вертикального профілю солоності це відхилення свідчить про невеликий розкид значень солоності, тому у розрахунках приймалося, що локальний вертикальний розподіл солоності практично однорідний в цьому шарі. Таким чином, розрахунок локального вертикального розподілу солоності проводився для глибини 50 метрів. Розрахована величина солоності на горизонті 50 метрів була постійною величиною для усього шару 0 – 50 метрів.

Локальний розрахунок вертикального розподілу температури та солоності води в Чорному морі за даними дистанційних вимірювань в шарі 0 – 50 метрів, тобто на декількох станціях, можливо провести, застосовуючи розроблені рівняння. Але якщо розраховувати по усій глибоководній акваторії Чорного моря, то цей процес дуже трудомісткий. Тому, автором розроблено автоматизований програмний комплекс для розрахунку вертикального розподілу полів температури та солоності води в Чорному морі за даними дистанційних вимірювань (далі – АПК). АПК включає 864 рівняння експоненціальної та лінійної регресії для розрахунку вертикального розподілу температури води у глибоководній акваторії Чорного моря по місяцях для періоду травень – жовтень; рівняння лінійної регресії для розрахунку поправок на температуру на горизонтах 10, 20, 25, 50 метрів; рівняння лінійної регресії для розрахунку швидкості звуку та рівняння для розрахунку солоності у діяльному шарі моря. До АПК також додано інтервали для встановлення типу рівнянь (експоненціальної або лінійної регресії) щодо розрахунку температури води. Таким чином, АПК автоматично визначає, де і за якими рівняннями

розраховувати вертикальний розподіл температури води і, відповідно, поправки на температуру та солоність води в шарі 0 – 50 метрів глибоководної частини Чорного моря.

Основні переваги розробленої методики та АПК для розрахунків вертикального розподілу термохалинних характеристик в діяльному шарі глибоководної частини Чорного моря на основі даних дистанційних вимірювань: швидкодія складних та численних обчислень; легкість та автоматизація розрахунків; мінімум вихідних даних та їх вільна і швидка доступність, що є економічно вигідним та зручним; область розрахунків покриває велику акваторію моря з просторовою розрізненістю  $4 \times 4$  км; здатність розраховувати вертикальний розподіл термохалинних характеристик як за допомогою АПК в цілому, так і розподіл окремих гідрофізичних характеристик програмними модулями в діяльному шарі глибоководної частини Чорного моря; за необхідності, легка та швидка модернізація АПК та програмних модулів.

В умовах формування однорідності шарів морського середовища застосування розробленої методики не вимагається.

На основі проведеної оцінки особливостей просторово-часового розподілу термохалинних параметрів та швидкості звуку, що розраховані за розробленою методикою, були здобуті підтвердження термохалинного стану, притаманного Чорному морю у теплий період року.

Виходячи з отриманих результатів досліджень у дисертаційній роботі, основна послідовність розрахунків вертикального розподілу полів температури та солоності води у глибоководній акваторії Чорного моря за даними дистанційних вимірювань в шарі 0 – 50 метрів в період весна – осінь має вигляд:

1. За допомогою критерія ( $\pm \Delta T$ ), який для Чорного моря становить  $\pm 2^\circ\text{C}$ , визначаються інтервали для встановлення типу рівнянь (експоненціальної або лінійної регресії) щодо розрахунку вертикального розподілу температури води в Чорному морі [ $T_{clim} - 2 < T_0 < T_{clim} + 2$ ].

2. Розрахунок вертикального розподілу полів температури води за рівняннями експоненціальної або лінійної регресії на основі супутникової інформації.

3. Введення поправок на температуру на глибинах 10, 20, 25, 50 метрів, залежно від місяця року для якого ведуться розрахунки вертикального розподілу температури води.

4. Обчислення швидкості звуку в Чорному морі за розрахованими значеннями температури води на основі супутникової інформації.

5. Обчислення розподілу полів солоності в Чорному морі за розрахованими значеннями температури води й швидкості звуку на основі супутникової інформації.

Принципи побудови АПК для розрахунку вертикального розподілу полів температури та солоності води в діяльному шарі Чорного моря на основі даних дистанційних вимірювань у перспективі можливо втілити у створення «Системи аналізу та моніторингу полів термохалинних характеристик на основі дистанційних методів вимірювань». За допомогою АПК можна оцінювати динаміку процесів в морському середовищі, особливості просторово-часової мінливості термохалинних характеристик та вплив їх змін на гідробіологічні, гідрохімічні, гідрофізичні процеси та екосистему моря в цілому.

Принципи побудови АПК, які випробувані на прикладі Чорного моря, можуть бути застосовані також для інших акваторій Світового океану з урахуванням їх гідрологічних умов.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у практику діяльності установ Національної академії наук України, Міністерства освіти і науки України, Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України.

**Ключові слова:** Чорне море, термохалинна структура, вертикальний розподіл, методика розрахунків, рівняння регресії, супутникова інформація, дистанційні вимірювання, температура та солоність води, швидкість звуку у воді.

## ABSTRACT

*Sryberko A.V.* Thermohaline structure and methods of calculating its spatial distribution in the active layer of the Black Sea. – Qualifying scientific work with manuscript copyright.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 103 – Earth Sciences. – Odessa State Environmental University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2023.

The thesis is devoted to solving a relevant scientific task of restoring the spatial distribution of thermohaline characteristics in the active layer of the marine environment based on the results of calculating their vertical profiles according to remote measurements. Today, for conducting research in the specialty 103 "Earth Sciences", in particular marine sciences, the problem of obtaining in-situ data of hydrophysical, hydrochemical and hydrobiological parameters of the World Ocean is very well known. This is primarily due to the lack of regular expeditionary studies of the marine environment, particularly in the Black Sea. The lack of in-situ data forces scientists to use calculated values to restore the spatial distribution of hydrometeorological characteristics for their further analysis and evaluation. This saves money and time resources that would have to be spent on expeditionary observations. Many aspects related to the study of the vertical thermohaline structure of the Black Sea waters, its seasonal variability now require a deeper study caused by global climate change. Therefore, the restoration of the spatial distribution of hydrophysical characteristics in the Black Sea is the relevant task. The solution of this task makes it possible to establish modern changes in hydrophysical parameters for research and applied purposes in the field of hydrography, hydroacoustics, oceanology, marine ecology, navigation, etc.

The development of a scientifically based methods for calculating the vertical distribution of thermohaline characteristics based on remote measurements for studying the spatio-temporal variability of temperature and salinity of the active layer



of the marine environment was the aim of dissertation research. The efficiency of its use on the example of the Black Sea deep-water area was also part of the research.

In the process of research, the following tasks were solved:

- to study the features of the hydrophysical processes of the Black Sea to determine the possibility of its use for testing remote methods of monitoring the marine environment; to show the characteristics of the thermohaline structure and dynamic processes of the Black Sea basin on the scales of seasonal and interannual variability;
- to build regression equations based on the identified statistical relationship between water temperature at neighboring levels in the Black Sea based on averaged water temperature data;
- to develop a scientific and methodological justification for the use of satellite observations data for calculating the vertical distribution of the temperature, sound speed and salinity fields in the marine environment;
- to conduct numerical experiments to determine the criteria for calculating the vertical distribution of water temperature according to the developed methods;
- to carry out calculations of vertical profiles of thermohaline characteristics in the active layer of the marine environment based on remote measurement data; to restore their spatial distribution based on the results obtained;
- to evaluate the features of the spatio-temporal distribution of thermohaline parameters and the speed of sound, calculated using the developed methods.

The active layer of the Black Sea deep-water area was the object of study. The thermohaline and hydroacoustic structure of waters, the vertical and horizontal distribution of the temperature, sound speed and salinity fields in the marine environment were the subject of study.

Mathematical and physical-statistical methods of analysis were used in the studies. Modern methods of visualization of research results were also applied. Regression and correlation analysis is the basis for method's development.

The study of the vertical distribution of water temperature and salinity in the Black Sea was carried out in the deep-water part sea at standard levels (0, 10, 20, 25,

30, 50 meters) in the spring-autumn period. This area of research is represented by the highest number of measurements and is included in the Main Black Sea current zone.

Among the most important results of the Ph.D. thesis obtained personally by the author, the following should be noted.

The experimentally calculated criteria for calculating the vertical distribution of water temperature by the developed methods were determined for the first time.

To improve the accuracy of the results of calculations of the vertical profile of water temperature, special corrections were determined.

Water temperature corrections are introduced on the levels of 10, 20, 25 meters during spring-summer, and in autumn – on the levels 10, 20, 25, 50 meters.

New methods for calculation of hydrophysical characteristics at depths up to 50 meters in the Black Sea deep-water area during the spring-autumn period are proposed:

- methods for calculating the vertical distribution of the water temperature fields based on satellite information, considering criteria and corrections for water temperature;
- methods for calculating the vertical distribution of the sound speed fields based on satellite information;
- methods for calculating the vertical distribution of water salinity fields based on remote measurement data.

Program modules for the automatic use of satellite information for calculating the vertical distribution of the fields of water temperature and sound speed in the marine environment have been developed and tested on the example of the Black Sea. The initial data for the calculations is only daily satellite data of the sea surface temperature.

Based on the in-situ data of salinity for the twenty-year period from 1999 to 2018, the author found that on average, the standard deviation of values in the local vertical distribution of salinity in the Black Sea deep-water area in the layer 0 - 50 meters during the spring-autumn period was about 0.24 ‰. For a sufficiently high approximation of the vertical salinity profile, this deviation indicates a small scatter of salinity values; therefore, it was assumed in the calculations that the local vertical

distribution of salinity is practically homogeneous in this layer. Thus, the calculation of the local vertical distribution of salinity was carried out for a depth of 50 meters. The calculated salinity at the 50-meter level was constant for the entire layer 0 – 50 meters.

The local calculation of the vertical distribution of water temperature and salinity in the Black Sea based on remote measurement data in the layer 0 – 50 meters at several stations is possible to carry out by applying the developed equations. But if the whole water area of the Black Sea should be counted, this process is very time-consuming. Therefore, the author developed an Automated Program Complex for calculating the vertical distribution of temperature and salinity fields in the Black Sea based on remote measurement data (hereinafter referred to as the APC). The APC includes 864 exponential and linear regression equations for calculation of the vertical distribution of water temperature in the Black Sea deep-water area by the months for the period May – October; linear regression equations for calculation of corrections for the temperature at levels of 10, 20, 25, 50 meters; linear regression equations for calculation of the speed of sound and equation for calculation of salinity in the active layer of the sea. Intervals for establishing the type of equations (exponential or linear regression) for calculating water temperature are also added to the APC. Thus, the APC automatically determines where and by what equations the vertical distribution of water temperature and, accordingly, the corrections for water temperature and salinity in a layer up to 50 meters in the Black Sea deep-water area can be calculated.

The main advantages of the developed methods and the APC for calculating the vertical distribution of thermohaline characteristics in the active layer of the Black Sea deep-water area based on remote measurement data:

- High-speed performance of complex and numerous calculations;
- Ease and automation of calculations;
- A minimum of initial data and their free and fast access, which is economically beneficial and convenient;
- The calculation area covers a large sea area with a spatial resolution of  $4 \times 4$  km;

– The ability to calculate the vertical distribution of thermohaline characteristics using both the APC as a whole and the distribution of individual hydrophysical characteristics by program modules in the active layer of the Black Sea deep-water area.

– If necessary, easy and quick modernization of the APC and program modules.

In the conditions of the formation of homogeneity between the layers of the marine environment, the use of the developed methods is not required.

The features of the spatial-temporal distribution of thermohaline parameters and the speed of sound, calculated using the developed method, have been estimated. The confirmation of the thermohaline state inherent in the Black Sea in the warm season was obtained.

Based on the obtained research results, the main sequence of calculations of the vertical distribution of the temperature and salinity fields in the Black Sea deep-water area based on remote measurement data in the 0–50 meters layer in the spring-autumn period is:

1. Using the criterion ( $\pm \Delta T$ ), which for the Black Sea is  $\pm 2^\circ\text{C}$ , intervals are determined to establish the type of equations (exponential or linear regression) to calculate the vertical distribution of water temperature in the Black Sea [ $T_{clim} - 2 < T_0 < T_{clim} + 2$ ];

2. Calculation of the vertical distribution of water temperature fields by exponential or linear regression equations based on satellite information.

3. Introduction of temperature corrections at depths of 10, 20, 25, 50 meters, depending on the month of the year for which the vertical distribution of water temperature is calculated;

4. Calculation of the speed of sound in the Black Sea at a depth of 50 meters on the calculated values of water temperature based on satellite information;

5. Calculation of the distribution of salinity fields in the Black Sea by calculated values of water temperature and the speed of sound based on satellite information.

The principles of building of the APC for calculation of the vertical distribution of temperature and salinity fields in the active layer of the Black Sea based on remote measurement data could serve as a basis for the establishment of a "System for analysis and monitoring of the fields of thermohaline characteristics in the Black Sea based on the remote measurements". With the help of the APC the dynamics of processes in the marine environment, the features of the spatio-temporal variability of thermohaline characteristics and effects of their change on hydrobiological, hydrochemical, hydrophysical processes and the ecosystem of the sea in general can be evaluated.

The principles of building of the APC can be applied to other water area of the World Ocean taking into account their hydrological conditions.

The results of the PhD thesis have been introduced into practice of the institutions of the National Academy of Sciences of Ukraine, the Ministry of Education and Science of Ukraine, the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine.

**Keywords:** Black Sea, thermohaline structure, vertical distribution, calculation methods, regression equations, satellite information, remote measurements, water temperature and salinity, speed of sound in water.