

# Особливості процесів конвекції та інтрузії вод на межі шару сірководневого зараження у Чорному морі в кліматичний період 1991—2020 років

*Р.Р. Белевич, О.Р. Андріанова, О.А. Батирев, М.І. Скіпа, 2023*

ДУ «Відділення гідроакустики Інституту геофізики НАН України», Одеса, Україна  
Надійшла 29 грудня 2022 р.

Порівняння сучасних гідрофізичних умов у Чорному морі з раніше аналізованим періодом 1903—1982 рр. виконано за матеріалами недавно створеного (1991—2020) кліматичного масиву середньомісячних термохалінних характеристик вод. Динаміку процесів у верхньому 150-метровому шарі (галокліні) Чорного моря оцінювали на підставі аналізу кліматичних матеріалів про вертикальний розподіл глибини залягання максимального градієнта солоності води, що інтерпретуються як верхня межа шару сірководню в Чорному морі. Для порівняння стану та сезонних коливань цієї характеристики при аналізі середньомісячних карт було виконано їх осереднення. За сучасними даними 1991—2020 рр. у відкритій частині моря виявлено більш інтенсивну інтрузію цих вод до горизонту 40 м, а в одному з районів (квадратів) навіть випадки природного виходу сірководню з глибини на поверхню. У часовій мінливості є чітко виражена піврічна циклічність, при цьому в сучасному розвитку процесів встановлено часове зміщення (зсув) на цілий сезон: у 1903—1982 рр. конвекція (опускання цих вод) відбувалась протягом осені—зими, а інтрузія (підйом) — весни—літа; у 1991—2020 рр. за такими ж кліматичними даними, конвекція проходила протягом зими—весни, а інтрузія — протягом літа—осені з максимальною глибиною залягання в період зимово-весняної конвекції та мінімальною — у період літньо-осінньої інтрузії вод. Осі зон північної та південної конвергенції тяжіють до відповідного узбережжя моря, а ось зони центральної дивергенції — до відкритих районів у його середній частині. Відмінності в глибині залягання між періодом конвекції та інтрузії в осях зон північної та південної конвергенції становили відповідно 21,5 та 17,5 м, а в осі зони центральної дивергенції — 7,5 м.

**Ключові слова:** Чорне море, температура, солоність, вертикальний розподіл, екстремуми, сірководень, конвекція, інтрузія, сезонні коливання.

**Вступ.** Еволюційно сформований водний баланс моря є одним із основних чинників, що визначають особливості його гідролого-гідрохімічного режиму. Оцінювання впливу глобальних кліматичних процесів є особливо актуальним стосовно Чорного моря через антропогенний вплив на прісну складову водного балансу.

Створення кліматичного масиву термохалінних характеристик вод Чорного моря

для епохи 1991—2020 роки дало змогу виявити сучасні особливості їхнього просторового розподілу та встановити зміни, що відбулися порівняно з періодом 1903—1982 років [Статистические..., 1987]. Цей масив використано для розрахунків глибини залягання верхньої межі шару сірководню ( $H_2S$ ) у сучасних умовах. Результати розрахунків, що наведені у попередній статті [Белевич та ін., 2022], характеризують

Citation: *Belevich, R.R., Andrianova, O.R., Batyrev, O.A., & Skipa, M.I. (2023). Features of the processes of convection and water intrusion at the boundary of the hydrogen sulfide contamination layer in the Black Sea in the climatic period 1991—2020. Geofizicheskiy Zhurnal, 45(2), 122—133. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i2.278339>.*

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

кліматичний період, що відноситься до середини минулого століття (1940 р.), тоді як дані нового масиву стосуються початку XXI століття (2005 р.).

Мета цієї роботи, як і раніше опублікованої [Белевич та ін., 2022], — оцінювання особливостей просторового розподілу та глибини залягання верхньої межі шару сірководневого зараження вод Чорного моря, який охоплює всю водну товщу нижче глибини 50—150 м, а також виявлення характеру часової мінливості цього параметра і динамічних процесів (конvekції та інтрузії) на масштабі місяців і сезонів.

**Матеріали та методи дослідження.** У сучасному кліматичному масиві термохалінних характеристик вод Чорного моря, створеному в 2021 р. науковим співробітником Одеського району гідрографічної служби України Ю.І. Поповим для періоду 1991—2020 рр., середньомісячні значення температури та солоності води представлені за глибиною з дискретністю вертикалі 10 м до 500 м, за часом — для кожного місяця. Узагальнення матеріалів проведено за даними 32 014 океанографічних станцій, які отримано переважно зондувальним комплексом під час судових спостережень та доповнено даними зондів профілометрів «Арго». Дані внесені до вузлів квадратів 40×60 миль на акваторії моря, аналогічно раніше зробленому у відомому масиві за 1903—1982 рр., що полегшує їхню обробку та порівняння. Методологію, яку використано для розрахунків, докладно викладено в публікації [Белевич та ін., 2022].

Глибину залягання максимального градієнта солоності води, що інтерпретується нами як верхня межа шару H<sub>2</sub>S зараження вод Чорного моря [Богуславський та ін., 2006], визначали таким чином. Для кожного квадрата за середньомісячними кліматичними значеннями глибини та солоності на горизонтах визначали її градієнт із глибиною за розрахунковою формулою:

$$\frac{\Delta S_n}{\Delta H_n} = \frac{S_n - S_{n-1}}{H_n - H_{n-1}},$$

де  $S_n$  — солоність на горизонті  $H_n$ ;  $S_{n-1}$  — солоність на горизонті  $H_{n-1}$ ;  $\Delta S_n/\Delta H_n$  —

градієнт солоності (зміна солоності на 1 м глибини). За вертикальним розподілом значень градієнтів знаходили максимум (сплеск на кривій) в зоні галокліну, який відповідає, згідно з прийнятою гіпотезою [Богуславський та ін., 2006], глибині залягання верхньої межі шару H<sub>2</sub>S. Паралельно вибирали відповідні цій глибині значення температури та солоності води, щоб отримати уявлення про всі параметри, які цікавлять нас у певному квадраті моря в обраному місяці.

**Результати досліджень та їх аналіз.** Результати узагальнених обчислень глибини залягання верхньої межі шару з H<sub>2</sub>S зараженням вод у Чорному морі, які були виконані за вказаною методикою, показано на рис. 1, а. Згідно з його аналізом, у часовій мінливості, на фоні слабких середньомісячних хвильових збурень у коливаннях наявна добре виражена піврічна хвиля: з глибоким заляганням верхньої межі шару вод з H<sub>2</sub>S зараженням у зимово-весняний період (з січня по червень) у середньому на горизонті 86 м і мінімальним його заляганням у літньо-осінній час (з липня по грудень) у середньому на горизонті 73,2 м. Середня різниця глибини залягання верхньої межі шару H<sub>2</sub>S між цими сезонами становить понад 13 м, а між місяцями з екстремумами (квітень і грудень) — навіть 19 м.

Дивує той факт, що починаючи з липня до грудня (включно) на акваторії моря йде процес інтрузії заражених H<sub>2</sub>S вод з межі розділу у шари, що лежать вище.

З літературних джерел [Суховей, 1986; Полонский, Попов, 2011] та наших попередніх даних [Белевич та ін., 2022] добре відомо, що в процесі розвитку осінньо-зимової конvekції, коли йде інтенсивне охолодження поверхневих вод з активізацією в цей період вітро-хвильового перемішування, відбуваються руйнування та опускання вглиб верхньої межі шару H<sub>2</sub>S. У весняно-літній період спостерігається зворотний процес інтенсивної інтрузії шару заражених H<sub>2</sub>S вод з його верхньої межі до шару, що лежить вище. Водночас у кліматичну епоху 1991—2020 років у ана-

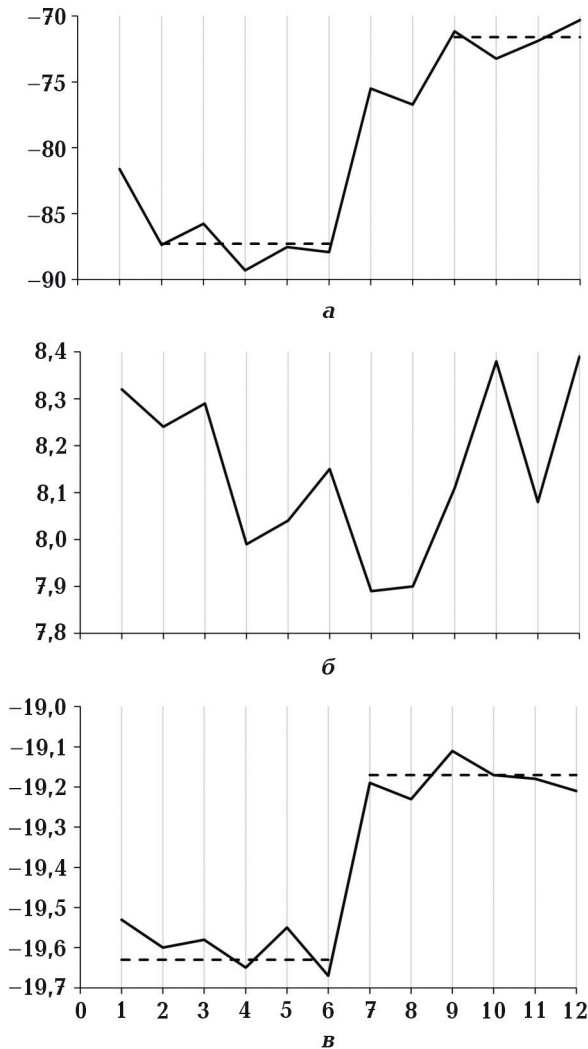


Рис. 1. Річний хід середніх по місяцях кліматичних значень глибини залягання (в м) верхньої межі шару вод з  $H_2S$  зараженням на акваторії Чорного моря за 1991—2020 роки (а) та відповідних їй температури (б) і солоності (в) води.

Fig. 1. Annual course of the monthly average climatic values of the depth (in m) of the upper boundary of the water layer with  $H_2S$  contamination in the Black Sea water area for the years 1991—2020 (a), the corresponding temperature (b) and salinity (v) of the water.

лізованому процесі відбулися суттєві часові зміни: процес конвекції змістився на зимово-весняний період (I—VI), а інтрузії — на літньо-осінній (VII—XII), що видно з рис. 1, а. Можливою причиною появи такого часового зсуву у розвитку зазначених процесів, на нашу думку, може бути глобальне потепління клімату на планеті, яке призводить до такого результату че-

рез інерційність розвитку явищ (інтрузії та конвекції) у підповерхневій товщі вод моря.

Далі наведено детальніший аналіз графіків кривих, що відображують внутрішньорічну мінливість узагальнених за місяцями положень кліматичних значень глибини залягання верхньої межі шару вод, заражених  $H_2S$  (див. рис. 1, а), а також значень температури (див. рис. 1, б) та солоності води (див. рис. 1, в) на цій глибині. Зауважимо, що побудованим кривим відповідають узагальнюючі числа, осереднені по всіх квадратах моря для кожного місяця року.

На графіку кривої внутрішньорічного ходу кліматичних значень глибини залягання верхньої межі шару  $H_2S$  зараження вод по місяцях (див. рис. 1, а) добре виділяється існування піврічної мінливості: циклу зимово-весняної конвекції (січень—червень) та циклу літньо-осінньої інтрузії (липень—грудень). Процес початку зимово-весняної конвекції характеризувався різким заглибленням кривої верхньої межі  $H_2S$  шару з грудня по січень на 10 м, з частковим продовженням навіть у лютому (5 м), у результаті приблизно на 15 м. Потім з лютого по червень також відбувалися хвильові її збурення між глибинами 85,5 м (березень) та 89,3 м (квітень) до 82,9 м у червні. Середня глибина верхньої межі шару  $H_2S$  у період зимово-весняної конвекції в кліматичну епоху 1991—2020 років за обчисленими нами оцінками (за 5 місяців, з лютого по червень) дорівнювала 87,3 м. Аналогічно процесу конвекції, літньо-осіння інтрузія відбувалась з липня по грудень, на кривій (див. рис. 1, а) вона виражена підйомом верхньої межі шару заражених  $H_2S$  вод з глибини до поверхні, який також починається з різкого стрибка з 82,9 м у червні до 75,5 м у липні (тобто на 7,4 м); з липня по серпень процес інтрузії загальмувався і глибина навіть опустилася на 1,2 м. Однак до вересня процес вирівнявся, а інтрузія знову різко зросла на 5,6 м. При цьому її глибина піднялася ще вище і досягла у грудні свого загального кліматичного мінімуму, що дорівнював 70,1 м. Гли-

бина вторинного мінімуму, що виявилась у вересні, становила 71,2 м. Середня кліматична глибина залягання верхньої межі шару  $H_2S$  у період літньо-осінньої інтрузії за виконаними нами оцінюваннями за чотири поряд розташованими на графіку місяцями (з вересня по грудень) дорівнювала 71,6 м при коливаннях її в цей період між 70,3 м (грудень) та 73,2 м (жовтень). Різниця глибин залягання середніх за періодами функціонування циклів конвекції (I—VI) та інтрузії (VII—XII) становила 15,7 м (87,3—71,6 м). При докладному аналізі процесу розвитку конвекції від місяця до місяця помічено цікавий факт хвилеподібної тенденції заглиблення верхньої межі шару вод, заражених  $H_2S$ , у більш глибокі шари, а в період розвитку інтрузії проявляється зворотний процес хвилеподібного підйому від місяця до місяця цього шару до поверхні моря (див. рис. 1, а).

Аналізуючи графік узагальненої кліматичної кривої (див. рис. 1, б), що характеризує внутрішньорічну часову мінливість розподілу температури води по місяцях на акваторії Чорного моря на глибині верхньої межі шару, зараженого  $H_2S$ , можна констатувати, що досягнення нею максимуму 8,39 °C приурочене до грудня — місяця, коли завершується процес інтрузії заражених вод до поверхні моря. Також до грудня і глибина залягання верхньої межі цього шару стає мінімальною й дорівнює 70,3 м. Процес конвекції та опускання вглиб верхньої межі шару вод, заражених  $H_2S$ , що настав у січні, мав би призвести до того, що мінімальну температуру води спостерігали б у червні, коли завершується процес конвекції та відбувається зміна його на інтрузію. Фактично мінімальне її значення 7,78 °C спостерігали у липні (див. рис. 1, б) на глибині 75,5 м, тоді як у червні на глибині, близькій до максимальної (87,9 м), її значення становило 8,15 °C, що далеко від мінімальної величини. Такий розподіл температури води в цей період, імовірно, обумовлений інерційністю розвитку динамічних процесів на таких глибинах (70—90 м) і не повністю завершеним процесом перебудови в полі температури

води та зсувом, що відбувся, на цілий сезон характеру їх розвитку.

У аналізованому раніше кліматичному періоді 1903—1982 років [Белевич та ін., 2022] процес конвекції заражених  $H_2S$  вод реєстрували з жовтня по березень, а процес інтрузії — з квітня по вересень. У кліматичну епоху 1991—2020 років процес конвекції заражених  $H_2S$  вод спостерігався із січня до червня, процес їх інтрузії — з липня по грудень. Таким чином, можна зробити висновок, що приблизно за піввіковий період (з середини ХХ до початку ХХІ ст.), унаслідок кліматичних змін, що відбулися на нашій планеті взагалі та в термохалінних і геохімічних процесах верхньої товщі вод Чорного моря зокрема, призвели до зсуву на цілий сезон описаних вище явищ. Можна зазначити також, що порушення, які спостерігаються в змінах температури води у травні та червні, пов'язані з процесом переходу періоду сезонного зсуву термінів настання конвекції та інтрузії вод на верхній межі шару  $H_2S$ , однак є ще не остаточно завершеними.

Аналізуючи графік узагальненого внутрішньорічного кліматичного ходу солоності води на верхній межі шару  $H_2S$  зараження вод (див. рис. 1, в), можна констатувати наявність у її часовій мінливості чітко вираженої піврічної циклічності. При цьому протягом першого півріччя в період функціонування процесу конвекції (I—VI) та глибокого залягання зараженого  $H_2S$  шару води значення солоності протягом усіх шести місяців коливалися в межах 19,53—19,67 ‰ за середнього її значення 19,63 ‰. З початку процесу інтрузії (липень) і до його кінця (грудень) солоність води, різко знизившись з червня (19,67 ‰) по липень (19,19 ‰) на 0,48 ‰, мала у залишок часу середньомісячні значення в межах 19,12—19,23 ‰ за середнього її значення за період 19,17 ‰. Середня величина розходження у змінах солоності між періодами конвекції (19,60 ‰) та інтрузії (19,18 ‰) дорівнювала 0,42 ‰.

Результати порівняння між двома епохами 1903—1982 та 1991—2020 років узагальнених за сезонами середніх кліматич-

них значень глибини залягання верхньої межі шару вод заражених  $H_2S$ , а також значень температури і солоності води на цій глибині наведено у таблиці.

Зазначимо, що для отримання середньої глибини залягання верхньої межі шару  $H_2S$  зараження вод у 1903—1982 роках для чотирьох сезонів року (зими, весни, літа та осені) використовувалося по 63 квадрати для кожного сезону. Кількість квадратів, що знадобилися для отримання таких же осереднень у 1991—2020 роках також за чотирма сезонами року, виявилася втричі більшою через використання масиву даних, що складається з 12 кліматичних місяців (з січня по грудень). Кожен місяць в новому сезонному масиві характеризувався осередненням від 65 до 71 квадратів, сезони виділялися осередненням за три місяця: зима (I, II, III), весна (IV, V, VI), літо (VII,

VIII, IX), осінь (X, XI, XII). Таким чином, кожен сезон епохи 1991—2020 років був результатом осереднення даних 195—210 квадратів моря, а в епоху 1903—1982 років лише даними всього 63 квадратів. Це свідчить про більш високу достовірність та надійність порівняльних розрахунків, наведених у таблиці та на сезонних картах положення і глибини залягання шару вод з сірководневим зараженням (рис. 2). Зазначимо, що різниця глибин шарів з  $H_2S$  зараженням між екстремальними сезонами (весна—літо) у 1903—1982 роках становила всього 7,5 м, а нині (у 1991—2020 роках) ця відмінність зросла більш як у 2 рази (16,2 м) та відбулася зміна сезону мінімуму з літа на осінь (див. таблицю). Більш детальний аналіз побудованих сезонних карт цієї характеристики вказує на чітку приуроченість осей північної та південної конвергенції до

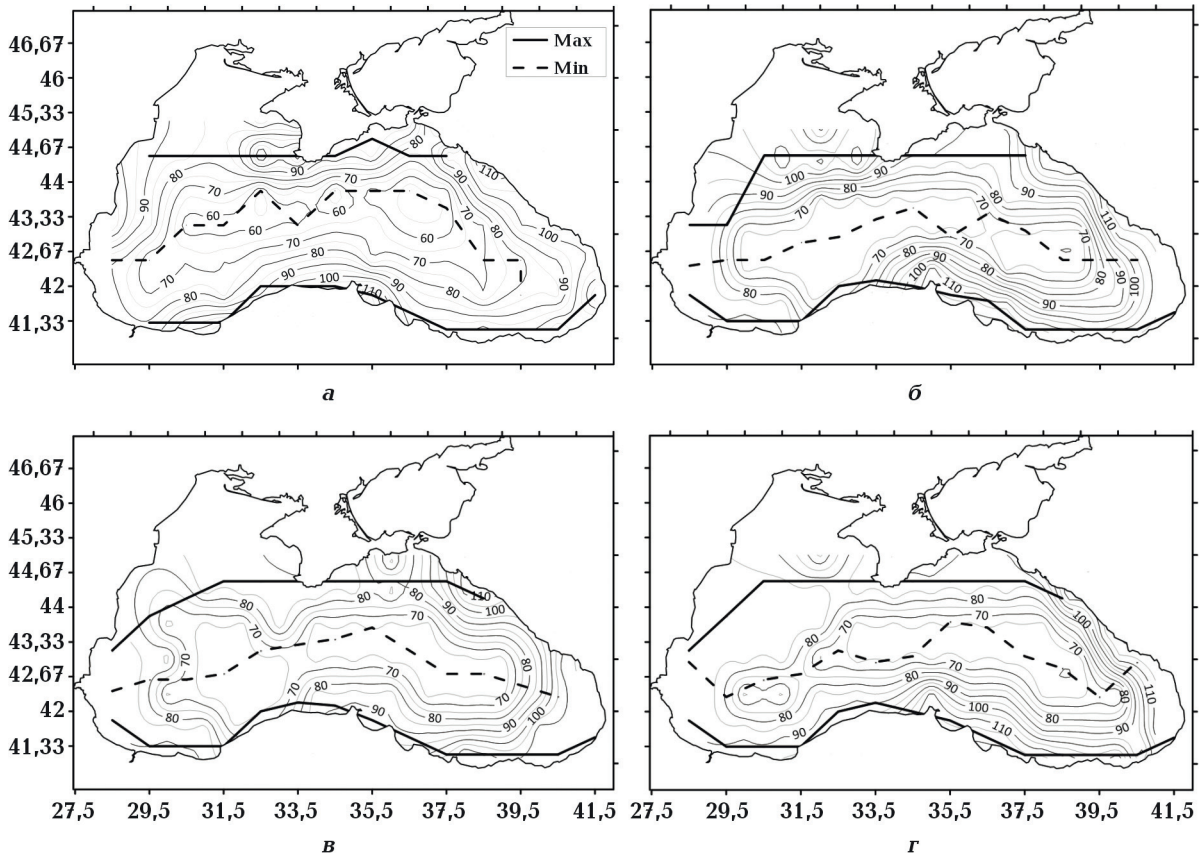


Рис. 2. Карты глубины залягання (в м) на акваторії Чорного моря верхньої межі шару  $H_2S$  з осями зон вергенції за 1991—2020 роки за сезонами: а — зима, б — весна, в — літо, г — осінь.

Fig. 2. Maps of the depth of occurrence (m) in the Black Sea water area of the upper boundary of the  $H_2S$  layer with the axes of vergence zones for the years 1991—2020 by seasons: а — winter, б — spring, в — summer, г — autumn.

відповідних узбереж, а центральної дивергенції — до відкритої частини моря. Весняний та літній сезони характеризуються великими циклонічними кругообігами, що простягаються через все море, окресленими відповідно ізолініями 70 і 60 м з дрібними осередками всередині. Зимовий та осінній сезони мають по два (західний та східний) круговороти. Особливо інтенсивний процес інтрузії, що виявився восени, встановлено у східному циклонічному кругообігу, коли глибина залягання в його центрі досягала позначки 33 м. У центрі західного круговороту глибина зараженого шару вище 40 м не піднімалася.

На фоні процесу руху до поверхні верхньої межі шару вод заражених  $H_2S$ , в одному з квадратів у відкритій частині моря в жовтні була виявлена глибина на рівні 20 м (координати квадрата  $43^{\circ}10'—43^{\circ}50'$  пн.ш. і  $35^{\circ}0'—36^{\circ}0'$  сх.д.), що може свідчити про вихід сірководню на поверхню моря. Випадки виходу вод, заражених  $H_2S$ , на поверхню Чорного моря у відкритих акваторіях вже мали місце у природних умовах [Секрети..., 2020], але жодних негативних наслідків цього встановлено не було. Можна припустити, що в природних умовах сірководень, що вийшов з води, у відносно невеликих кількостях відразу ж вступає у взаємодію з киснем атмосфери й нейтралізується. Зовсім інша картина виникнення екстремальних катастрофічних умов спостерігається за розвитку природних подій, таких як підводні землетруси, виверження вулканів тощо, які також можуть супроводжуватися виходом  $H_2S$  на поверхню моря. Прикладом цього може бути зафіксований випадок викиду Чорним морем великої кількості сірководню в приводну атмосферу під час Ялтинського землетрусу у вересні 1927 р. За спогадами очевидців цього землетрусу, в ніч з 11 на 12 вересня море спалахнуло вогнем, а вогняні факели піднімалися до висоти 500 м над рівнем моря. При цьому від води налітав нестерпний тухлий запах. На думку фахівців, спрацювало відразу два фактори: тектонічні хвилі — цунамі [Доценко, Ингеро́в, 2007], що завжди виникають при

таких явищах, зруйнували морські шари, утворені бульбашки з  $H_2S$  стали підніматися та виходити на поверхню, але цей газ негорючий. Одночасно землетруси викликають ще розломи і тріщини в земній корі, з яких виринає горючий газ, що там накопичився, про існування якого в Чорному морі також добре відомо [Шнюков, 2005]. Саме вихід метану став причиною появи вогняних факелів у морі.

Аналізуючи поведінку екстремумів сезонних характеристик за епоху 1991—2020 років за періодами конвекції та інтрузії, можна чітко констатувати, що на відміну від епохи 1903—1982 років всі отримані результати переконливо засвідчують про сезонний зсув у розвитку динаміки та функціонування процесів: конвекція в цей період відбувається з січня по червень, а інтрузія — з липня по грудень. Водночас окремі фактори при детальному щомісячному аналізі вказують на те, що процес такої сезонної перебудови ще остаточно не завершився: спостерігаються два максимуми у глибині залягання верхньої межі шару  $H_2S$  навесні у квітні — 89,3 м та у червні — 87,9 м і два максимуми температури води у грудні —  $8,38^{\circ}C$  та у червні —  $8,16^{\circ}C$  у період функціонування процесу конвекції (I—VI).

Поряд з викладеними вище результатами аналізу узагальнених по всьому масиву даних щодо динамічних процесів, які відбуваються на акваторії Чорного моря в його підповерхневих водах, доречно висвітлити також особливості розвитку динамічних процесів в осях усіх трьох зон вергенцій, виділених на кожній з 12 побудованих середньомісячних кліматичних карт аналізованої характеристики епохи 1991—2020 років.

Порівняння результатів аналізу розвитку динамічних процесів у Чорному морі в епоху 1991—2020 років з попереднім періодом (епохи 1903—1982 років) показало, що з середини минулого століття (1940—1950) донині відбувся часовий кліматичний зсув процесів конвекції (з осінньо-зимового на весняно-літній) та інтрузії (з весняно-літнього на літньо-осінній період). Тому

для періоду 1991—2020 років виявилось цікавим простежити також характер часових змін у виділених осях зон вергенцій за 12 середньомісячними кліматичними картами глибини залягання верхньої межі шару вод, заражених  $H_2S$ . На цих картах інформація наведена для акваторії моря у вузлах сітки квадратів 40 на 60 миль за широтою та довготою відповідно. Таким чином, все море на карті представлено сіткою з 7 послідовно лежачих 40-мильних смуг за широтою та 9—14 (залежно від конфігурації берегової лінії) 60-мильних квадратів за довготою. Місячна карта зазвичай описується 69—72 квадратами, а зональні осі екстремумів (дивергенції та конвергенції) — 9—14 квадратами.

Після обробки аналізованих карт на кожній було виділено по дві зональні осі з максимальними значеннями глибини залягання (зони північної та південної конвергенції), що прилягають відповідно до північного та південного узбережжя моря та одну зональну вісь (зона дивергенції), що проходить приблизно через центральну частину моря з мінімальними значеннями цієї характеристики. Для кожного місяця було визначено також широтне положення квадратів із екстремумами глибини на акваторії моря. З аналізу річного ходу кліматичної середньомісячної величини мінливості екстремальних значень глибини залягання верхньої межі шару вод, заражених  $H_2S$ , епохи 1991—2020 років (рис. 3) бачимо чітко виражену піврічну циклічність, властиву всім трьома кривими (осям зон вергенцій). При цьому більш глибоке залягання визначено у перше півріччя (I—VI), а мілке — у другу половину року (VII—XII) або відповідно по зонах вергенцій: північна конвергенція — 105/83,5 м; південна конвергенція — 107/89,5 м; центральна дивергенція — 67/59,5 м. Різниця глибин між періодом глибокого та мілкового залягання осей зон вергенцій становила відповідно 21,5; 17,5 та 7,5 м, а часове положення глибокого залягання осей зон вергенцій припадало чітко на перше півріччя (I—VI), а мілке — на другу половину року (VII—XII), що підтверджує раніше зробле-

ний висновок щодо кліматичного зсуву на цілий сезон функціонування процесів конвекції та інтрузії у підповерхневому шарі вод Чорного моря за період з середини ХХ до початку ХХІ ст. Часові коливання широтного положення осей зон конвергенцій не перевищували 0,2—0,3° широти, а осі зони дивергенції — 0,5° широти. Їхні середньорічні широтні значення дорівнювали відповідно: 44,40° пн.ш., 43,00° пн.ш. та 41,48° пн.ш.

Загальне уявлення про зональний розподіл уздовж Чорного моря середньомісячних кліматичних значень глибини залягання верхньої межі шару вод, заражених  $H_2S$  (рис. 4, а), а також їх широтне положення

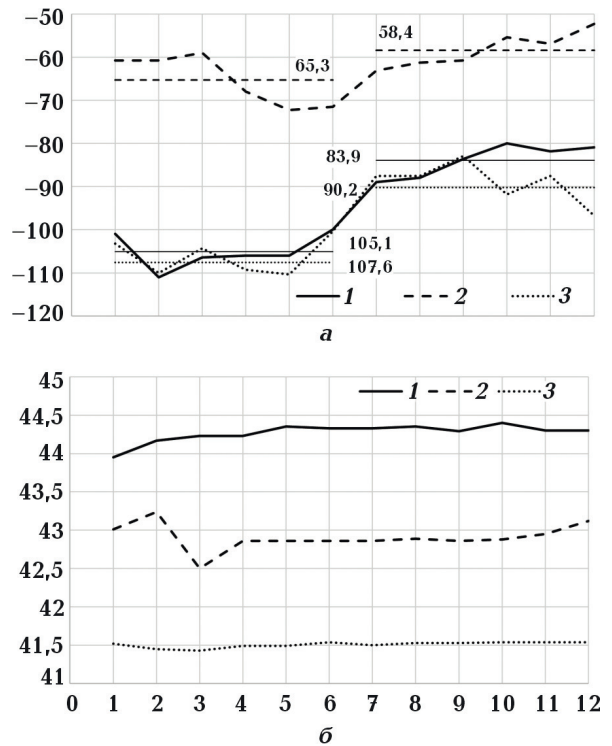


Рис. 3. Річний хід кліматичних середніх по місяцях екстремальних значень глибини залягання (м) верхньої межі шару вод з  $H_2S$  зараженням в осях зон вергенцій (а) та їх широт (б) на акваторії Чорного моря за 1991—2020 роки: 1 — північна конвергенція, 2 — центральна дивергенція, 3 — південна конвергенція.

Fig. 3. Annual course of the climatic average monthly extreme values of the depth (m) of the upper boundary of the water layer with  $H_2S$  contamination in the axes of the vergence zones (a) and their latitude (b) in the water area of the Black Sea for the years 1991—2020: 1 — northern convergence, 2 — central divergence, 3 — southern convergence.

на акваторії моря (рис. 4, б) можна скласти за кривими, побудованими через кожен градус довготи між 28° і 41° сх.д. Так, найбільш мілке та північне положення глибини залягання осі зони центральної дивергенції приурочено до середньої частини моря, де протягом 9° довготи між 30° і 39° сх.д. її значення становили 52,5—62 м, а абсолютний мінімум — 52,5 м був зафіксований (за річного осереднення) на 43°35' пн.ш. та 35°30' сх.д. Поблизу в квадраті моря між 37°—38° сх.д. на 43° пн.ш. було зафіксовано й вторинний мінімум глибини (53,3 м). За межами 9° смуги при зміщенні до західного узбережжя (від 30° сх.д.) глибина залягання осі зони дивергенції зростає до 80 м на 28,5° сх.д., а широтне положення мінімуму опускається до 42°30' пн.ш. При зміщенні до східного узбережжя (за межі 39° сх.д.) описаний процес повторюється:

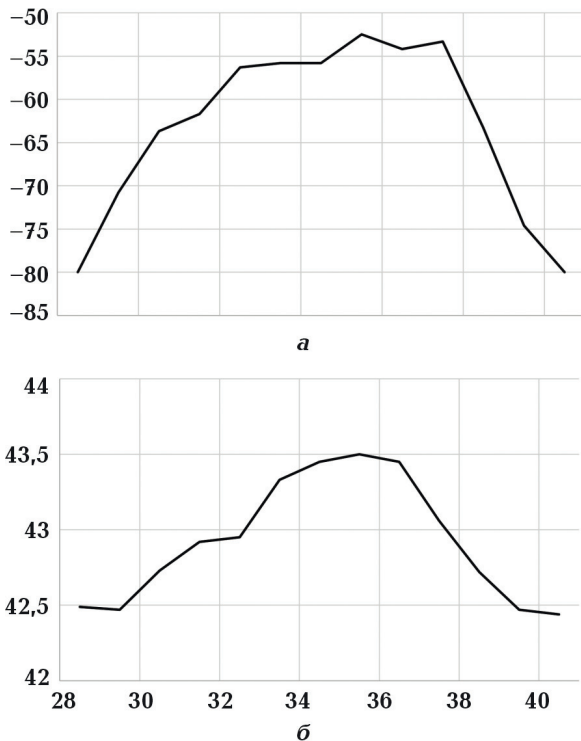


Рис. 4. Зональний розподіл середньорічних мінімальних значень глибини залягання верхньої межі шару вод з H<sub>2</sub>S зараженням (а) та їх широтне положення (б) на акваторії Чорного моря за 1991—2020 роки.

Fig. 4. Zonal distribution of average annual minimum values of the depth of the upper limit of the water layer with H<sub>2</sub>S contamination (a) and their latitudinal position (b) in the Black Sea water area for the years 1991—2020.

глибина залягання на 40—41° сх.д. опускається до 85 м і широтне положення на цій довготі знижується до 42°25' пн.ш. Отже, просторове положення аналізованого мінімуму осі зони дивергенції на карті Чорного моря має вигляд півмісяця, зверненого в середній частині опуклою стороною на північ, а кінцями, спрямованими до берегів на південь.

Просторово-часові зміни у значеннях мінімальної глибини залягання верхньої межі шару вод, заражених H<sub>2</sub>S, в осях зони дивергенції на акваторії Чорного моря оцінювали протягом року (рис. 5) за кліматичними картами епохи 1991—2020 років. Ці значення представлено по горизонталі в зональному протязі між 28,5° та 40,5° сх.д. через кожен градус довготи, а по вертикалі — в осях зони дивергенції для кожного місяця. Між 32,5—33,5° сх.д. та 35—38,5° сх.д. восени (жовтень—грудень) наявні добре виражені збурення у вигляді двох осередків з мінімальною глибиною залягання верхньої межі шару вод зара-

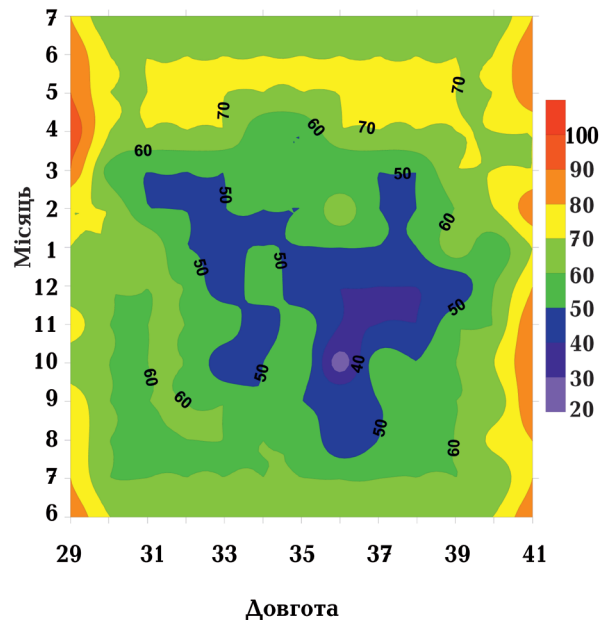


Рис. 5. Просторово-часовий розподіл протягом року мінімальних середньомісячних значень глибини залягання верхньої межі шару вод з H<sub>2</sub>S зараженням на акваторії Чорного моря за 1991—2020 роки.

Fig. 5. Spatial-temporal distribution during the year of the minimum monthly average values of the depth of the upper limit of the water layer with H<sub>2</sub>S contamination in the Black Sea water area for the years 1991—2020.



жених  $H_2S$ : широтне положення першого з них належить до  $42,9—43,2^\circ$  пн.ш., а другого — до  $43,2—43,7^\circ$  пн.ш.

Отримана відповідність осередків з мінімальною глибиною залягання верхньої межі шару вод, заражених  $H_2S$ , центрам циклонічних кругообігів вод Чорного моря узгоджується також із висновком авторів публікації [Рябинин, Кравец, 1989]. При цьому в подальшому автори стверджують, що внутрішньорічна динаміка розвитку сірководневої зони (розмірів і положення) має визначатися внутрішньорічною динамікою зазначених кругообігів моря (західного, центрального та східного). З рис. 5 також можна вважати, що ступінь інтенсивності процесів інтрузії зараженої  $H_2S$  води в кожному з осередків різна: у першому з них (розташований на  $42,9—43,2^\circ$  пн.ш. і  $32,5—33,5^\circ$  сх.д.) вода, піднімаючись у цей період з глибин до поверхні, не спостерігається вище 40-метрової позначки; у другому осередку (розташований на  $43,2—43,6^\circ$  пн.ш. і  $35—36^\circ$  сх.д.) процес інтрузії виявляється настільки значним, що ця вода пробиває верхню межу галокліну (розташована в цей період на глибині 27 м) та вторгається у верхній однорідний й добре збагачений киснем шар, активно з ним перемішується та руйнується, виділяючи газоподібну частину  $H_2S$  у приводний шар повітря. Від спостерігачів, які працювали в цьому районі приблизно в той же час року, відомо, що у повітрі відчувався запах сірководню.

**Висновки.** За підсумками дослідження, можна зробити узагальнюючі висновки про зміни у водах Чорного моря, пов'язані

із зростанням коливань клімату на нашій планеті в епоху 1991—2020 років.

У підповерхневих водах Чорного моря на верхній межі шару  $H_2S$  зараження відбулося велике часове зміщення (зсув) на цілий сезон характеру розвитку процесів інтрузії (підйому) до поверхні моря та конвекції (опускання) вглиб цих вод у процесі їх річного циклу. За кліматичними даними 1903—1982 років [Белевич та ін., 2022], опускання цих вод відбувалось протягом осені—зими, а піднімання — весни—літа; у період 1991—2020 років за такими самими кліматичними даними процес опускання проходить протягом зими—весни, а піднімання до поверхні — літа—осені.

Відмінності між екстремумами сезонних коливань глибини залягання шару  $H_2S$  зараження зросли більше, ніж удвічі: минулої епохи становили всього 7,5 м (між весною та літом), а у сучасну епоху досягли 16,2 м (див. таблицю).

Аналіз часового ходу екстремальних середньомісячних кліматичних значень глибини залягання верхньої межі шару вод з  $H_2S$  зараженням в осях зон вергенцій показав, що в них є чітко виражена піврічна циклічність з максимальною глибиною залягання в період зимово-весняної конвекції (яка дорівнює в осях північної та південної конвергенції відповідно 105 і 107 м) і мінімальною — у період літньо-осінньої інтрузії вод (дорівнює в цих же осях у середньому 83,5 та 89,5 м відповідно). В осі зони центральної дивергенції значення глибини в зазначені періоди дорівнювали відповідно 67 і 59 м. Відмінності в глибині залягання між періодом конвекції та інтрузії

**Результати порівняння узагальнених за сезонами (зима, весна, літо, осінь) основних термохалинних та динамічних кліматичних характеристик вод Чорного моря на верхньої межі шару сірководню протягом двох епох — 1903—1982 і 1991—2020 років**

Сезон	1903—1982 рр.			1991—2020 рр.			Різниця		
	$H$ , м	$t_w$ , °C	$S$ , ‰	$H$ , м	$t_w$ , °C	$S$ , ‰	$\Delta H$ , м	$\Delta t_w$ , °C	$S$ , ‰
Зима	84,0	7,82	19,32	84,3	8,20	19,57	0,3	0,38	0,25
Весна	85,3	7,56	19,30	88,3	8,06	19,63	3,0	0,50	0,33
Літо	78,8	7,79	19,39	74,5	7,83	19,17	-4,3	0,04	-0,22
Осінь	81,3	7,94	19,43	72,1	8,16	19,18	-9,2	0,22	-0,25
Середньорічне	82,6	7,82	19,36	84,8	8,06	19,39	2,2	0,14	0,08

зії в осях зон північної та південної конвергенції становили відповідно 21,5 та 17,5 м, а в осі зони центральної дивергенції — 7,5 м.

Аналіз кліматичних особливостей зонального розподілу середніх до року мінімальних значень глибини залягання верхньої межі шару з  $H_2S$  зараженням на акваторії відкритих вод Чорного моря, а також положення самої осі зони дивергенції показав, що найбільш мілководне та північне положення ось займає в центральній частині моря між  $32\text{—}37^\circ$  сх.д. і  $43,0\text{—}43,5^\circ$  пн.ш. з глибинами, що не перевищують 60 м ( $52,5\text{—}58,3$  м). Під час руху до західного та східного узбереж від зазначеного центру глибина залягання осі зони дивергенції зростає до 80 м (відповідно на  $28\text{—}29^\circ$  і  $40\text{—}41^\circ$  сх.д.), а широтне положення зміщується на південь до  $42,5^\circ$  пн.ш. біля обох узбереж.

За розподілом мінімальних середньомісячних кліматичних значень глибини залягання верхньої межі шару з  $H_2S$  зараженням можна побачити наявність воєни двох осереднень з найменшими значеннями з положеннями центрів: першого —  $42,9\text{—}43,2^\circ$  пн.ш. та  $32,5\text{—}33,5^\circ$  сх.д.; другого —  $42,2\text{—}43,6^\circ$  пн.ш. та  $35,8\text{—}36,1^\circ$  сх.д.

Виявлено різний ступінь інтенсивності розвитку процесів: якщо в першому з них інтрузія вище 40 м не піднімалася, то у другому, «пробивши» галоклін, інтрузія вийшла на 20-метрову позначку, тобто сірководень виходить на поверхню моря.

Отже, продовження досліджень гідрофізичної структури Чорного моря за зазначеним напрямом набуває все більшої актуальності, що пов'язано не тільки із глобальними кліматичними змінами, а насамперед із затвердженням проєкту нового каналу «Стамбул». Це штучний водний шлях будується в Турецькій Республіці на європейській стороні, який з'єднає Чорне море з Мармуровим морем. Проєкт має бути закінчений до 100-річного ювілею зі дня заснування Турецької Республіки в 2023 р. За проєктом канал «Стамбул» буде розташований за кілька десятків кілометрів на захід від протоки Босфор та його довжина становитиме 63 км. У зв'язку з цим проєктом виникає потреба оцінити можливі зміни в термохалинному режимі поверхневих вод моря, які насамперед заповнять канал та будуть витікати з нього, впливаючи на розташування межі сірководневої зони.

### Список літератури

- Белевич Р.Р., Андриіанова О.Р., Скіпа М.І. Сезонні зміни положення верхньої межі сірководневої зони Чорного моря у зв'язку з характером розвитку динамічних процесів. *Геофиз. журн.* 2022. Т. 44. № 1. С. 145—157. <https://doi.org/10.24028/gzh.v44i1.253716>.
- Богуславский С.Г., Совга Е.Е., Казаков С.И. Влияние поля солености на положение верхней границы зоны сероводорода в Черном море. *Морской гидрофиз. журн.* 2006. № 1. С. 16—21.
- Доценко С.Ф., Ингеров А.В. Характеристики черноморских цунами по данным измерений. *Морской гидрофиз. журн.* 2007. № 1. С. 21—31.
- Полонский А.Б., Попов Ю.И. *Условия формирования вод холодного промежуточного слоя Черного моря.* Севастополь: Изд. МГИ НАН Украины, 2011. 52 с.
- Рябинин А.И., Кравец В.Н. *Современное состояние сероводородной зоны Черного моря (1960—1986 годы).* Москва: Гидрометеоздат, 1989. 232 с.
- Статистические характеристики термохалинной структуры вод Черного моря.* Сб. под ред. Э.Н. Альтмана. Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. Государственный океанографический институт. Севастопольское отделение, 1987. 302 с.
- Суховой В.Ф. *Моря Мирового океана.* Ленинград: Гидрометеоздат, 1986. 287 с.
- Секрети Чорного моря.* EMBLAS Plus. Київ, 2020, 63 с. Режим доступу: <https://emblasproject.org/secrets-of-the-black-sea-ukr>.
- Шнюков Е.Ф. Газогидраты метана в Черном море. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана.* 2005. № 2. С. 41—52.

## Features of the processes of convection and water intrusion at the boundary of the hydrogen sulfide contamination layer in the Black Sea in the climatic period 1991—2020

*R.R. Belevich, O.R. Andrianova, O.A. Batyrev, M.I. Skipa, 2023*

The State Institution «Hydroacoustic Branch of Institute of Geophysics of NAS of Ukraine», Odesa, Ukraine

The comparison of modern hydrophysical conditions in the Black Sea with the previously analyzed period of 1903—1982 was carried out based on the materials of the recently created (1991—2020) climate array of average monthly thermohaline characteristics of waters. The dynamic of processes in the upper 150-meter layer (halocline) of the Black Sea was evaluated based on the analysis of climatic materials on the vertical distribution of the depth of the maximum water salinity gradient, which is interpreted as the upper boundary of the hydrogen sulfide layer in the Black Sea. The comparison of state and seasonal fluctuations of this characteristic during the analysis of average monthly maps was carried out by their averaging. According to modern data (1991—2020), in the open part of the sea, a more intense intrusion of these waters up to a horizon of 40 m was found, as well as single cases of natural release of hydrogen sulfide from the depth to the surface. There is a clearly pronounced semi-annual cyclicity in temporal variability; however, in the modern period, the shift was for the whole season: in 1903—1982, the convection (the downwelling of these waters) occurred during autumn-winter, and intrusion (upwelling) — during spring-summer; in 1991—2020 according to the same climatic data, convection occurs during winter-spring, and intrusion occurs during summer-autumn, with the maximum depth of occurrence during the period of winter-spring convection and the minimum during the period of summer-autumn water intrusion. The axes of the northern and southern convergence zones laying near the corresponding coasts of the sea, and the axis of the zone of central divergence is close to open areas in its middle part. By these axes, the differences in the depth of occurrence between the period of convection and intrusion in the northern and southern convergence zones were 21.5 and 17.5 m, respectively; for the central divergence zone, it was 7.5 m.

**Key words:** Black Sea, temperature, salinity, vertical distribution, extremes, hydrogen sulfide, convection, intrusion, seasonal fluctuations.

### References

- Belevich, R.R., Andrianova, O.R., & Skipa, M.I. (2022). The seasonal changes in the position of the upper boundary of the Black Sea hydrogen sulfide zone due to the nature of the dynamic processes development. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(1), 145—157. <https://doi.org/10.24028/gzh.v44i1.253716> (in Ukrainian).
- Boguslavsky, S.G., Sovga, E.E., & Kazakov, S.I. (2006). Influence of the salinity field on the position of the upper boundary of the hydrogen sulfide zone in the Black Sea. *Marine Hydrophysical Journal*, (1), 16—21 (in Russian).
- Dotsenko, S.F., & Ingerov, A.V. (2007). Characteristics of Black Sea tsunamis according to measurement data. *Marine Hydrophysical Journal*, (1), 21—31 (in Russian).
- Polonskiy, A.B., & Popov, Yu.I. (2011). *Conditions for the formation of waters of the cold intermediate layer of the Black Sea*. Sevastopol: MGI NAS of Ukraine, 52 p. (in Russian).

- Ryabinin, A.I., & Kravets, V.N. (1989). *The current state of the hydrogen sulfide zone of the Black Sea (1960—1986)*. Moscow: Gidrometeoizdat, 232 p. (in Russian).
- Altman, E.N. (Ed.). (1987). *Statistical characteristics of the thermohaline structure of the Black Sea waters*. USSR State Committee for Hydrometeorology and Environmental Control. State Oceanographic Institute. Sevastopol branch, 302 p. (in Russian).
- Sukhovoy, V.F. (1986). *Seas of the World Ocean*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 287 p. (in Russian).
- Secrets of the Black Sea*. (2020). EMBLAS Plus. Kyiv, 63 p. Retrieved from <https://emblasproject.org/secrets-of-the-black-sea-ukr> (in Ukrainian).
- Shnyukov, E.F. (2005). Methane gas hydrates in the Black Sea. *Geology and minerals of the World Ocean*, (2), 41—52 (in Russian).