

УДК 551.465.4, 551.463.6

## МІНЛИВІСТЬ ТЕРМОХАЛИННОГО РЕЖИМУ ВОД МЕКСИКАНСЬКОЇ ЗАТОКИ У 2005-2017 РОКАХ

Ю. Ель Хадрі, М. А. Берлінський, Д. Ю. Волков, М. О. Сліже

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [magribinets@ukr.net](mailto:magribinets@ukr.net)

Мексиканська затока є великою, продуктивною, морською і прибережною екосистемою, яка забезпечує товарами і послугами жителів узбережжя, а також сусідні регіони. Води затоки відіграють значну роль у формуванні клімату не тільки в прибережних районах, тепловий стан вод цього регіону також надає безсумнівний вплив на розвиток атмосферних процесів над Атлантикою і Європою. Довгострокова мінливість клімату в регіоні Мексиканської затоки може вплинути на силу Гольфстріму і перенесення тепла в океані, а також на економічну активність і екологічну стабільність всієї Північно-Західної Атлантики. Метою даної роботи є визначення особливостей мінливості режиму температури та солоності вод Мексиканської затоки в останні десятиліття.

Дослідження проводилося на основі даних регіональної кліматології Мексиканської затоки (GOM RC) версія 2, отриманих з сайту Національних центрів екологічної інформації (NCEI) NOAA, були використані значення температури та солоності води на різних глибинах за період 2005-2017 рр. Аналіз показав, що у Мексиканській затоці в 2005-2017 рр. просторовий розподіл середньорічної температури води на поверхні (*SST*) демонструє її зниження з півдня на північ. Найбільша її величина відзначається біля північно-західних берегів Куби та у прибережній зоні затоки Кампече, найменша *SST* – в затоці Бухта Аппалачі, розташованої у північно-східній частині Мексиканської затоки. Порівняння розподілу *SST* у 1985-2017 та 1955-1984 роках показало, що найбільше збільшення *SST* спостерігається у північній, північно-східній і північно-західній частинах затоки (до 2,9° C). Зменшення *SST* відзначається в центральній, західній частинах затоки та в південно-східній частині затоки Кампече (до -1,3° C). У зимовий період спостерігаються значні горизонтальні градієнти *SST*, в теплий період поле *SST* має більш однорідний характер. Мінімальна середньомісячна *SST* відзначається в січні, максимальна – в вересні. Найбільш чітко сезонні зміни температури виражені в водах північної частини акваторії Мексиканської затоки біля берегів США. Розподіл середньорічної солоності на більшій частині акваторії Мексиканської затоки має однорідний характер, тільки в північній частині затоки, особливо в районі, де в затоку впадають води річки Міссісіпі, величина солоності різко зменшується. Для визначення стратифікації вод були побудовані графіки розподілу температури та солоності води на різних глибинах в різних районах затоки.

**Ключові слова:** Мексиканська затока; температура; солоність; стратифікація

### 1. ВСТУП

Мексиканська затока є одним з найбільш цікавих районів Світового океану. Води затоки відіграють значну роль у формуванні клімату не тільки в прибережних районах, тепловий стан вод даного регіону надає безсумнівний вплив на розвиток атмосферних процесів над Атлантикою і Європою, а й по суті формують Гольфстрім, який в перекладі з англійської мови означає – потік з затоки.

Оскільки фізичні процеси, які відбуваються в океані і атмосфері, одночасно взаємодіють між собою, то одна частина системи океан-атмосфера безпосередньо впливає на іншу. Зміна гідрологічного стану океану змінює стан атмос-

фери над даною ділянкою вод, що призводить до зміни погодних умов (хмарності, швидкості вітру, температури повітря тощо), це в свою чергу робить зворотний вплив на океан. Тому детальне вивчення особливостей і динаміки гідрологічного режиму водних об'єктів, особливо таких, як Мексиканська затока, має важливе значення для розуміння процесів, що відбуваються в системі океан-атмосфера і процесів, що формують регіональний клімат.

Мексиканська затока є великою, продуктивною, морською і прибережною екосистемою, яка забезпечує товарами і послугами жителів узбережжя, а також сусідні регіони. Це регіонально і глобально важлива водойма, яка з'єднується че-

рез Флоридську протоку з системою Гольфстріму і являє собою різноманітну сукупність водних середовищ існування.

Довгострокова мінливість клімату в регіоні Мексиканської затоки може вплинути на силу Гольфстріму і перенесення тепла в океані, а також на економічну активність і екологічну стабільність всієї Північно-Західної Атлантики.

Метою даної роботи є визначення особливостей режиму температури та солоності вод Мексиканської затоки в останні десятиліття (період 2005-2017 рр.), а також визначення зміни просторового розподілу температури води на поверхні у 1985-2017 рр. порівняно з 1955-1984 рр.

## 2. ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНИЙ ОПИС МЕКСИКАНСЬКОЇ ЗАТОКИ

Мексиканська затока розташована на північно-західній околиці тропічної зони Атлантичного океану, в широтному вигині північно-американського континенту і обмежена зі сходу лінією, що проходить через півострів Флорида і о. Куба (рис. 1). Площа Мексиканської затоки становить  $1\,602 \cdot 10^3 \text{ км}^2$  [1].

Береги затоки низинні, вирівняні з лагунами, прибережна частина мілководна. Звужена південна частина акваторії, яка вдається до материка і обмежена зі сходу півостровом Юкатан, носить назву затока Кампече. З півночі береги

низькі та болотисті. На північному узбережжі розташована велика дельта річки Міссісіпі, яка вдається далеко в море.

Мексиканська затока з'єднується з Карибським морем широкою та глибокою Юкатанською протокою, ширина якої становить 115 миль. Західна частина протоки мілководна, центральна і східна частини мають глибини більше 1000 м. З Атлантичним океаном затоку з'єднує Флоридська протока, ширина якої між островами Куба і Флорида-Кіс близько 80 миль. У цій частині глибини в протоці досягають 1200-1300 м. Мінімальні глибини в протоці спостерігаються в її найвузькій частині, між Великою Багамською банкою і півостровом Флорида.

Потік вод, що потрапляють до Мексиканської затоки через Юкатанську протоку розділяється на дві струмені – праву і ліву. Ліва струмінь проходить уздовж берегів півострова Юкатан і утворює циклонічну циркуляцію в затоці Кампече. Правий потік, проходить уздовж кубинського узбережжя і виходить через Флоридську протоку до Атлантичного океану.

Великий циклонний кругообіг вод, розташований на широті, де знаходиться і головний антициклонічний кругообіг Мексиканської затоки, знаходиться в її східній частині. Ці кругообіги

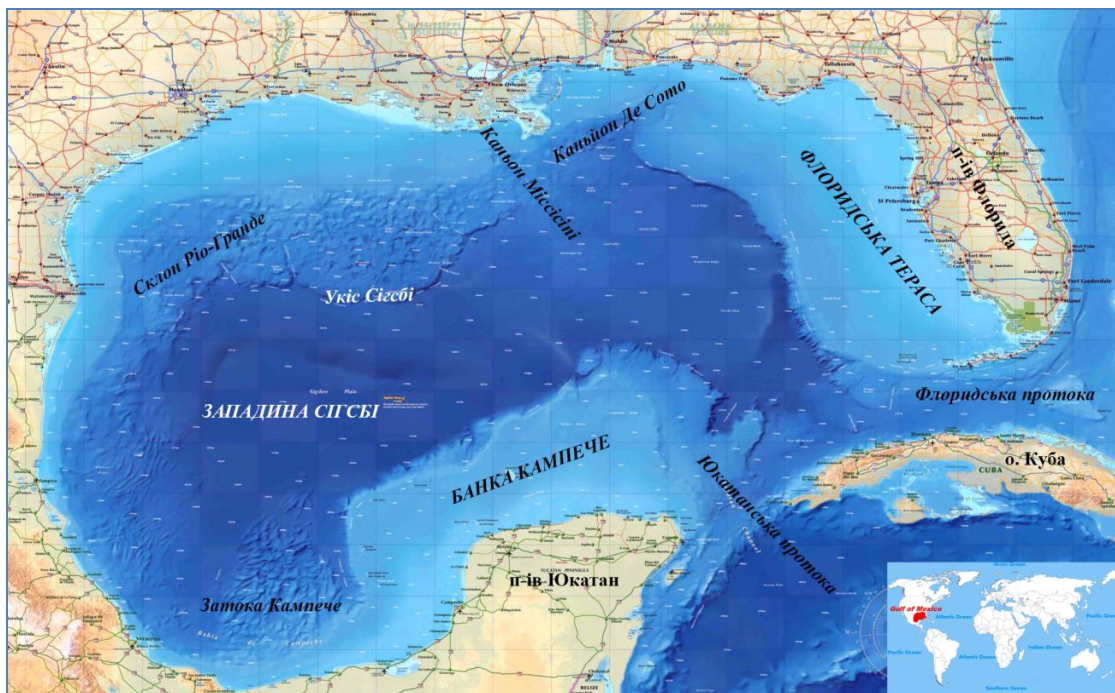


Рис. 1 – Карта Мексиканської затоки з основними елементами підводного рельєфу

Fig. 1 – Map of the Gulf of Mexico with the main elements of the underwater terrain

повільно рухаються в західну частину затоки протягом декількох тижнів і місяців [2]. Їх діаметр становить від 200 до 400 км, та вони проникають до глибини 1000 м [3]. Вихори взаємодіють один з одним і краєм шельфу при їх переміщенні на захід, що має важливі наслідки для місцевого біологічного відтворення. У центрах холодних кругообігів (циклонічних) відбувається апвелінг, а в центрах теплих антициклонічних кругообігів спостерігається даунвеллінг [4, 5].

В результаті в берегові райони транспортуються поживні речовини і організми. Поверхневі течії створюють зв'язок між екосистемами всередині та за межами затоки, транспортуючи поживні речовини, личинки, саргасум та інші важливі організми для підтримки життя в океані.

Циркуляція вод на континентальному шельфі має змінний характер, регульований, в основному, зміною напрямків місцевих вітрів, а також формується під впливом стоку великих річок, глибоководної циркуляції та, в деякій мірі, припливами. Переважаючи південно-східні вітри сприяють утворенню кругообігів в північній частині затоки.

Мексиканська затока є дев'ятою за величиною водоймою в світі, вона визнана однією з 64 великих морських екосистем Національним управлінням океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA) [6]. Економічно та екологічно затока є однією з найбільш продуктивних і важливих водойм [7].

Акваторія затоки розташована в тропічному кліматичному поясі, лише її північна частина – в субтропічному. Увесь рік над затокою панують тропічні повітряні маси. Клімат Мексиканської затоки визначається пасатною циркуляцією повітря і характеризується великою однорідністю. Сезонні коливання метеорологічних елементів невеликі, за винятком її північної частини.

Мексиканська затока відрізняється різноманітністю зимових температурних умов [1]. У її північній частині температура повітря в січні становить 12-14° С, а в південній – перевищує 22° С. Найбільші температури спостерігаються в липні та становлять понад 28° С. Відносна вологість повітря над акваторією затоки на північ від тропіків має значення менше 70 %, а в північно-східній частині навіть менше 60 %. Мінімум вологості повітря відзначається в лютому-квітні, максимум – в липні-вересні.

Найбільше число днів з опадами припадає на червень-вересень (20-22 дні на місяць). У цей період сумарна місячна кількість опадів становить від 88 мм в липні до 130 мм в вересні [8].

Хмарність над Мексиканською затокою протягом року в середньому становить близько 5 балів, а в північній половині затоки в червні-серпні – менше 4 балів.

Тепловий та водний баланс моря має велике значення для розуміння процесів формування режиму температури і солоності вод. Сезонні та міжрічні коливання температури води в значній мірі визначаються відповідними коливаннями радіаційного балансу моря та витратою тепла на випаровування і турбулентний теплообмін, а коливання солоності – змінами співвідношення між осадками і випаровуванням. Сумарний за рік тепловий баланс в затоці становить 740 МДж/м<sup>2</sup>. Це надмірне надходження тепла, по відношенню до його втрат через поверхню, витрачається внаслідок адвекції холодних вод в області циклонічного кругообігу в затоці Кампече, з яким пов'язаний підйом глибинних вод.

Найбільш значні сезонні коливання всіх складових теплового балансу спостерігаються в північній частині Мексиканської затоки, де радіаційний баланс досягає максимуму в травні (630 МДж/м<sup>2</sup>), а мінімуму в грудні (165 МДж/м<sup>2</sup>). Втрати тепла на випаровування і турбулентний обмін з атмосферою мають зворотний сезонний хід: в грудні і січні вони складають близько 750 МДж/м<sup>2</sup>, а в серпні -200 МДж/м<sup>2</sup>. Таким чином, тепловий баланс коливається від 370 МДж/м<sup>2</sup> на місяць в травні-серпні до -580 МДж/м<sup>2</sup> на місяць в грудні-січні. Сумарний за рік тепловий баланс в цій частині затоки від'ємний і складає близько -1100 МДж/м<sup>2</sup>. Ця надлишкова витрата тепла через поверхню на випаровування і турбулентний обмін з атмосферою (головним чином в зимовий сезон) компенсується припливом більш теплих вод з Карибського моря [1].

Береговий стік грає помітну роль у змінах солоності тільки в прибережних районах океану і внутрішніх морях, де водообмін з океаном утруднений наявністю високих порогів і вузькістю проток. Будучи великим приймаючим басейном, Мексиканська затока отримує великий водозбірний стік з п'яти країн – Канади, Куби, Гватемали, Мексики і США. Річка Міссісіпі домінує в дренажних системах на півночі, а річкова система Гріхальва-Усумасінта панує на півдні. Уздовж узбережжя затоки розташовано тридцять три основні виходи річок і 207 заток, естуарійів і лагун [6]. В затоку впадає близько половини річок Мексики і одна третина річок Куби.

До Мексиканської затоки надходять води найбільшої річки Північної Америки – Міссісіпі.

Площа її басейну становить приблизно 3,27 млн км<sup>2</sup>, що є третім за величиною показником в світі після Амазонки і Конго. Середньодобова витрата води Міссісіпі складає 21940 м<sup>3</sup>/с [9], що дорівнює 63 % від загального річкового стоку в Мексиканську затоку.

Другим за обсягом стоку є басейн річок Гріхальва і Усумасінта, що беруть початок в горах Сьера Мадре на півдні Мексики і впадають в затоку Кампече. Даний водозбір має площу 103300 км<sup>2</sup>, його середньодобова витрата води складає 3727 м<sup>3</sup>/с, що становить 10,8 % від загального річкового стоку в затоку [10].

Значний внесок у водний баланс Мексиканської затоки вносять річки південно-східної частини США, їх сумарний стік дорівнює 10,5 % від загального річкового стоку в затоку. Річки Аппалачікола, Чоктохатчі, Ескембія, Томбігбі, Алабама, Паскагула і Перл-Рівер сильно розрізняються за розміром, гідрологією, геоморфологією та хімічним складом води, але мають схожий режим. Сумарна площа їх водозбору становить понад 265000 км<sup>2</sup> з приблизною сумарною добовою витратою води 4000 м<sup>3</sup>/с. Даний регіон характеризується великою кількістю опадів, уздовж і поблизу узбережжя затоки їх середньорічна кількість становить від 150 до 165 см на узбережжі, але знижується до 120-135 см всередині країни [11].

### 3. АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Температура води на поверхні (*SST*) значно впливає на клімат Мексиканської затоки, а також на його екосистеми. Наприклад, від величини *SST* залежить кількість водяної пари, яка експортується, що визначає траєкторії переміщення ураганів у даному регіоні. Тривалі аномалії *SST* в затоці змінюють перенесення вологості до більш високих широт, і таким чином, мають погодуутворюючу дію в сусідніх регіонах. Мінливість *SST* впливає на велику кількість цінних біологічних ресурсів затоки, а саме на чисельність популяцій рожевої креветки, черепахи *Eretmochelys imbricata* (що знаходиться на межі повного зникнення) і морських окунів [12]. Це в свою чергу безпосередньо впливає на величину морського улову, тому що в водах затоки існують комерційно важливі регіональні рибні ресурси, які є особливо чутливими до змін *SST*.

Мало що відомо про десятилітню і довгострокову мінливість *SST* в водах Мексиканської затоки. У деяких дослідженнях [13] повідомлялося про існування постійних сигналів зміни температури з періодами від 60 до 80 років, які

можуть бути пов'язані з низькочастотними коливаннями Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO). Результати дослідження [12] показали, що характерний для вод затоки 60-річний цикл коливання *SST* особливо чітко простежується в південній частині затоки в басейні Кампече та на шельфі Юкатана, що також може бути пов'язано з квазіглобальним постійним кліматичним явищем AMO. У той же час, в північній частині затоки на *SST* впливає 10-річний цикл, який, ймовірно, пов'язаний з мінливістю у стоці річки Міссісіпі.

Вивчення сезонної мінливості *SST*, що проводилося за допомогою термодинамічних моделей, які використовували в якості вхідних даних швидкість і напрям вітру, океанічні течії, приплив підземних вод і тиск насиченої пари на поверхні моря [14] показало, що річний хід *SST* в регіоні знаходиться під впливом теплоперенесення, зокрема через канал Юкатан, що викликано динамікою атмосфери в місячному масштабі та процесами адвекції.

В цілому, вивчення температурного режиму вод Мексиканської затоки показало, що загальне збільшення середньої сезонної температури влітку в придонному шарі на північному шельфі перевищує в 1,9 рази річне збільшення температури повітря в цьому регіоні, і в 4,7 рази підвищення глобальної температури океану з 1998 по 2014 рр. [15].

Наслідки потепління вод Світового океану для організмів його мешканців добре вивчені – це зменшення розмірів бактерій, донних безхребетних і риб [16]. Наприклад, середня вага і довжина 3-, 4- і 5-річних особин риби *Menhaden* (улов якої становить приблизно половину виллову риби на узбережжі Атлантичного океану і Мексиканської затоки в США) скоротилися на обох берегах на 15 %. Отже, наслідки цієї зміни у розмірі впливають на індивідуальну здатність до ікрометання *Menhaden*, що далі поширюється по всьому харчовому ланцюжку [17]. В результаті, на тлі підвищення температури океану, обсяг щорічного виллову *Menhaden* за останні 65 років скоротився.

Останні десятиліття людство перебуває в пошуках нових видів енергії для задоволення своїх зростаючих потреб і збереження сталого розвитку. Одним з інноваційних способів отримання енергії з вод океану є технологія, що дозволяє виробляти її від змішування солоної та прісної води. Взаємодія прісної та солоної води може дати необмежену, безкоштовну і чисту електроенергію, в основі вироблення якої лежить так званий градієнт солоності, що виникає при змішуванні двох видів води [18]. Таким чином, на-



копичення інформації про просторово-часовий розподіл солоності має велике значення для аналізу умов, сприятливих для розміщення таких електростанцій та, взагалі, для переходу всієї морегосподарської діяльності на принципи «Блакитної економіки».

#### 4. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вивчення режиму температури та солоності проводилося на основі даних регіональної кліматології Мексиканської затоки (GOM RC) версія 2, отриманих з сайту Національних центрів екологічної інформації (NCEI) NOAA [19]. Для аналізу були використані значення температури ( $T$ ) та солоності ( $S$ ) води на різних глибинах за період 2005-2017 рр.

Дані регіональної кліматології Мексиканської затоки (GOM RC) версія 2 були випущені в жовтні 2020 року [20] і включають до себе інформацію з бази даних Світового океану 2018 (WOD18) і Атласу Світового океану 2018 (WOA18) [21], а також містять більш докладні термохалинні поля і оновлену інформацію по океанографічним змінним, недоступним в попередніх версіях. Оновлення істотно переглядає і розширює вихідну GOM RC, яка була випущена в 2010 році після розливу нафти Deepwater Horizon і оновлена у 2011 році. Дані Базис даних Світового океану 2018 (WOD18) представляють собою асиміляцію даних спостережень на океанологічних станціях, виміри, зроблені з морських дослідницьких суден, пришвартованих і дрейфуючих буїв.

Домен GOM RC включає в себе квадрат, обмежений координатами: 18-35° пн.ш., 98-75°зх.д. Середньорічні значення температури води і солоності в GOM RC розраховуються як середнє значення за 12 місяців, і представлені у вигляді поля зі значеннями у вузлах сітки з кроком 1° на горизонтах від 0 до 5500 м. Середньомісячні поля мають просторову роздільну здатність 0,1° x 0,1° і доступні на глибинах від 0 до 1500 м [20].

#### 5. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

##### 5.1 Термічний режим

Аналіз просторового розподілу середньорічної  $SST_{річн}$  Мексиканської затоки за даними за період 2005-2017 рр. показав, що досить чітко простежується її зниження з півдня на північ (рис. 2а). Найбільше її значення (27,3° C) відзначається біля північно-західних берегів Куби та у прибережній зоні затоки Кампече, найменша

$SST_{річн}$  (23,8° C) спостерігається в затоці Бухта Аппалачі, розташованій у північно-східній частині Мексиканської затоки.

Аналіз зміни середньорічної  $SST$  в 1985-2017 рр. у порівнянні з 1955-1984 рр. (рис. 2б) показав, що її збільшення відзначається у північній (до 2,9° C), північно-східній (до 2,5° C) і північно-західній (2,1° C) частинах затоки, а також у західних берегах затоки Кампече (до 1,6° C) та в водах банки Кампече (до 1,1° C). Зменшення  $SST$

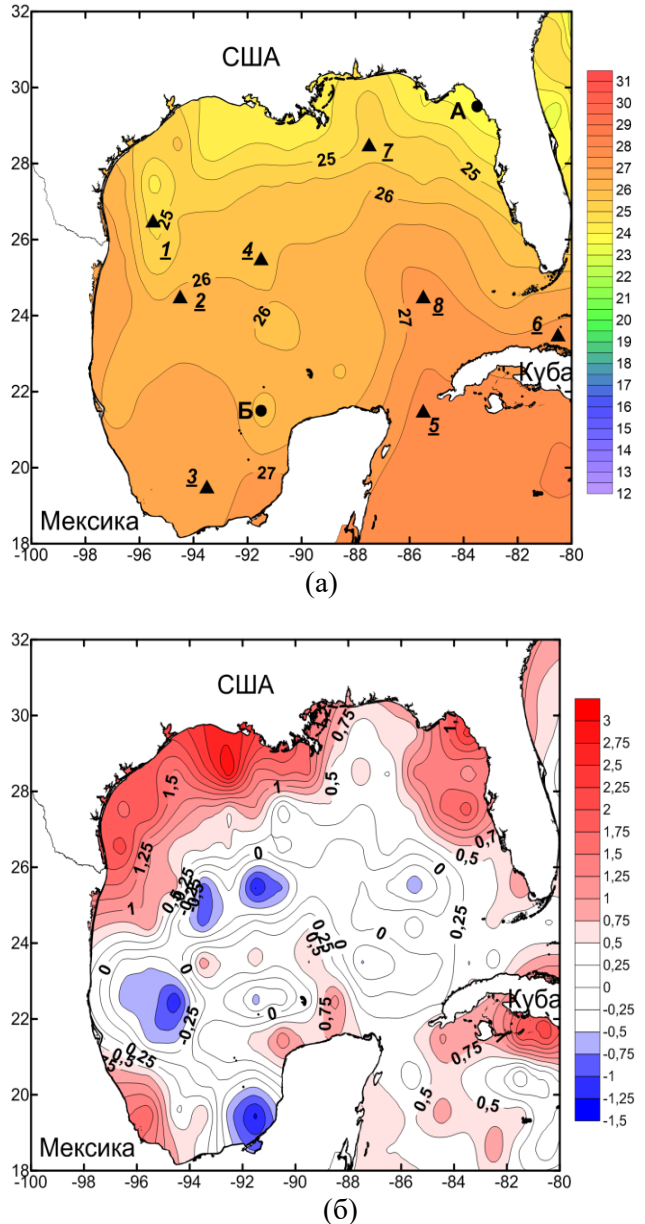


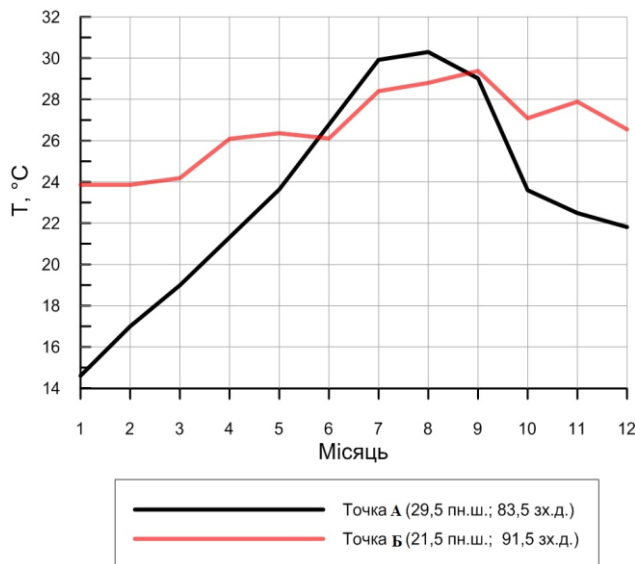
Рис. 2 – (а) –  $SST_{річн}$  (° C) за період 2005-2017 рр., трикутниками вказані точки, для яких побудовані графіки розподілу по глибині температури і солоності, (б) – зміна  $SST_{річн}$  (° C) в 1985-2017 vs. 1955-1984 рр.

Fig. 2 – (а) –  $SST_{an}$  (° C) for 2005-2017, triangles indicate the points for which the graphs of the distribution of the depth of temperature and salinity, (б) – change  $SST_{an}$  (° C) in 1985-2017 vs. 1955-1984

спостерігається в центральній (до  $-1,3^{\circ}\text{C}$ ), західній (до  $-1,2^{\circ}\text{C}$ ) частинах затоки та в південно-східній частині затоки Кампече (до  $-1,3^{\circ}\text{C}$ ). Такі зміни протилежного знака в різних частинах затоки можуть бути пов'язані з описаним вище 10-річним циклом мінливості SST в північній частині та 60-річним циклом SST в південній частині затоки.

Дослідження режиму вод затоки, виконані у 60-70 роках минулого століття [1] показали, що зростання SST в напрямку з півдня на північ виражено досить чітко, однак і тут зональність в її розподілі порушується через особливості циркуляції вод затоки. У південній частині, в затоці Кампече, температура води становила  $26^{\circ}\text{C}$  взимку і дещо перевищувала  $26^{\circ}\text{C}$  влітку. На півночі Мексиканської затоки вона була менше  $20^{\circ}\text{C}$  взимку, але досягала  $29^{\circ}\text{C}$  і навіть  $30^{\circ}\text{C}$  влітку.

Найбільш чітко сезонні зміни SST виражені в водах північної частини акваторії Мексиканської затоки біля берегів США. Як видно з рисунку 3, в точці А мінімум SST відзначається в січні ( $14,6^{\circ}\text{C}$ ), а максимум у серпні ( $30,3^{\circ}\text{C}$ ), амплітуда річного ходу становить  $15,7^{\circ}\text{C}$ . У точці Б графік річного ходу SST має більш згладжений вигляд, з мінімумом в січні-лютому ( $23,9^{\circ}\text{C}$ ) і максимумом у вересні ( $29,4^{\circ}\text{C}$ ), річна амплітуда становить  $5,5^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 3** – Річний хід SST ( $^{\circ}\text{C}$ ) в північно-східній частині (точка А) і в південній частині (точка Б) Мексиканської затоки для періоду 2005-2017 рр.

**Fig. 3** – Seasonal cycle SST ( $^{\circ}\text{C}$ ) in the north-eastern part (point A) and in the southern part (point B) of the Gulf of Mexico in 2005-2017

Для визначення стратифікації вод були побудовані графіки розподілу температури води на різних глибинах в різних районах затоки (таблиця 1, рис. 2). Розподіл температури води з глибиною (рис. 4) демонструє, що квазіоднорідний шар поширюється до глибини 20-50 м. Нижче розташований термоклін (шар найбільшого падіння температури), який поширюється до глибини 150-300 м. На його нижньому рівні температура води у всіх точках має значення близько  $15-17^{\circ}\text{C}$ . Потім вертикальний градієнт температури зменшується і нижче горизонту 900-1300 м (рис. 4б, г, д, ж, з) розташовуються глибинні води, температура яких становить близько  $5^{\circ}\text{C}$ .

**Таблиця 1** Координати точок, в яких були побудовані графіки розподілу температури та солоності води за глибиною

**Table 1** Coordinates of points at which graphs of distribution of temperature and salinity of water on depth were plotted

Точки	Координати		Примітка, місце розташування
	$\varphi, ^{\circ}\text{пн.ш.}$	$\lambda, ^{\circ}\text{зх.д.}$	
1	26,5	95,5	північно-західна частина затоки в зоні дії антициклонічного кругообігу вод
2	24,5	94,5	західна частина затоки в зоні дії антициклонічного кругообігу вод
3	19,5	93,5	затока Кампече
4	25,5	91,5	підніжжя укусу Сігсбі
5	21,5	85,5	Юкатанська протока
6	23,5	80,5	Флоридська протока
7	28,5	87,5	каньйон Де Сото
8	24,5	85,5	південно-східна частині затоки

З попередніх досліджень [1] відомо, що води Мексиканської затоки добре стратифіковані до глибини 1200 м, слабо стратифіковані у шарі 1200-1800 м і абсолютно однорідні нижче 1800 м (до самого дна). Спостережувані в Карибському морі водні маси надходять з Атлантичного океану, тому характер стратифікації пов'язаний з глибиною порогів в протоках Малих і Великих Антильських островів.

В цілому можна сказати, що на формування температурного режиму вод Мексиканської затоки сильно впливає радіаційний баланс, зміна котрого простежується в широтній зміні середньорічних температур води на поверхні затоки, а також у характері її сезонній зміні. Значною мірою на розподіл температури впливає адвекція тепла течіями, а також формування холодних осередків сформованих під впливом динамічних чинників, таких як даунвелінг та апвелінг, що виникають в центрах антициклонічних і циклонічних кругообігів вод.

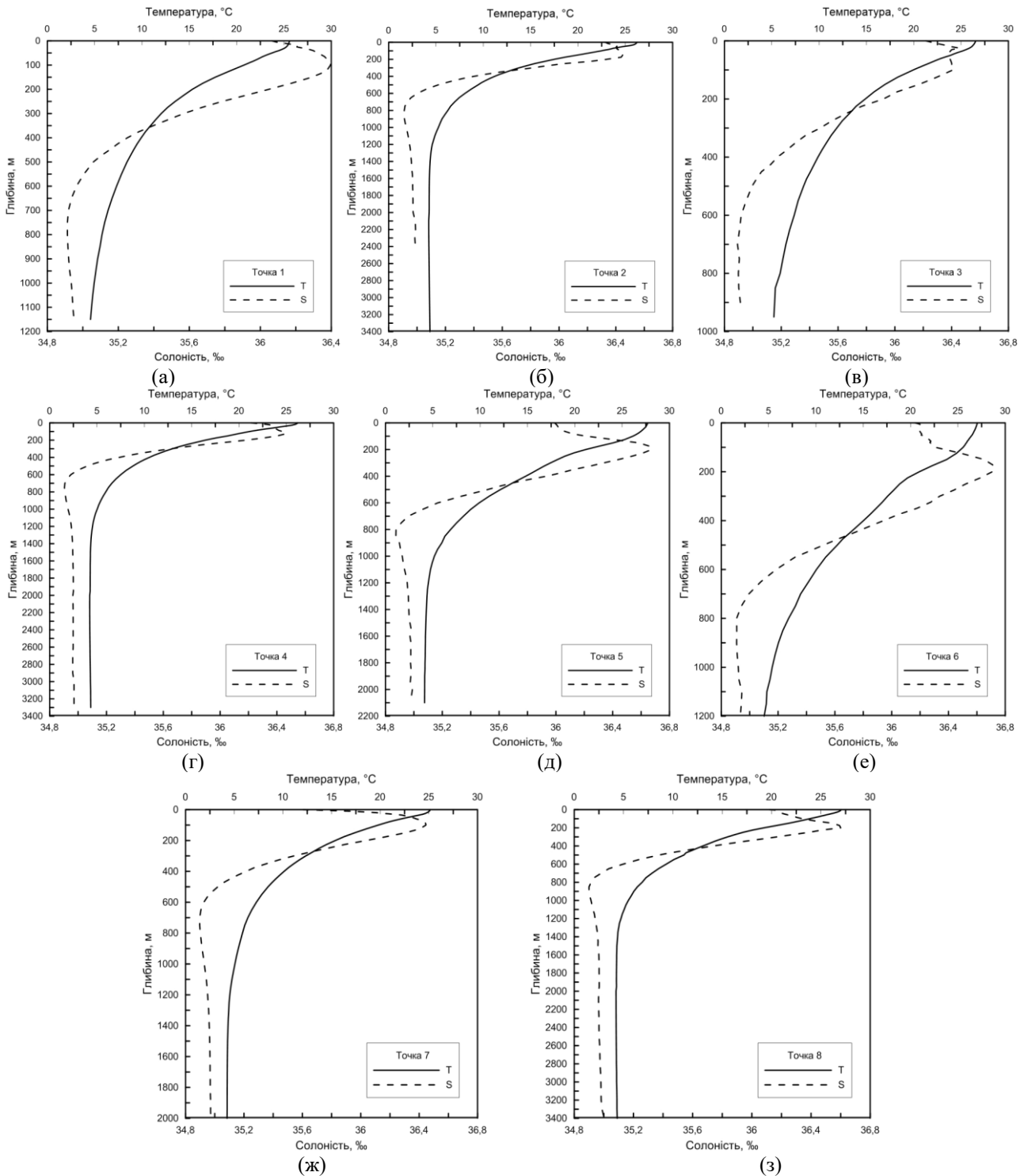


Рис. 4 – Розподіл температури морської води і солоності з глибиною: (а) – точка 1, (б) – точка 2, (в) – точка 3, (г) – точка 4, (д) – точка 5, (е) – точка 6, (ж) – точка 7, (з) – точка 8 (див. табл. 1)

Fig. 4 – Distribution of  $T$  and  $S$  in points: (a) – 1, (б) – 2, (в) – 3, (г) – 4, (д) – 5, (е) – 6, (ж) – 7, (з) – 8 (see table 1)

## 5.2 Солоність вод

Неоднорідність поля солоності океану формується головним чином в результаті зміни концентрації солей в поверхневому квазіоднорідному шарі через випаровування і опади. Глибше

цього шару поле солоності формується тільки в результаті взаємодії між перенесенням солей течіями та їх дифузисю при турбулентному обміні.

Горизонтальний розподіл солоності в поверхневому шарі обумовлений різними причинами:

кількістю опадів, випаровуванням, річковим стоком, підйомом або опусканням і горизонтальним переносом вод. Річковий стік помітно впливає на солоність вод в прибережних районах, і найбільш помітно – поблизу гирл великих річок. Як видно з рисунка 5, на більшій частині акваторії Мексиканської затоки розподіл солоності має однорідний характер зі значеннями близько 36,0-36,5 ‰. Тільки в північній частині затоки, особливо в районі де в затоку впадають води річки Міссісіпі, величина солоності має свої мінімальні значення (менше 32 ‰).

Найбільша солоність відзначається в затоці Кампаче, де незважаючи на достатнє випадіння опадів, розташована область зі значеннями більше 37 ‰. Причиною цього є вихід на поверхню солоної підповерхневої субтропічної води, обумовлений її циклонічним рухом.

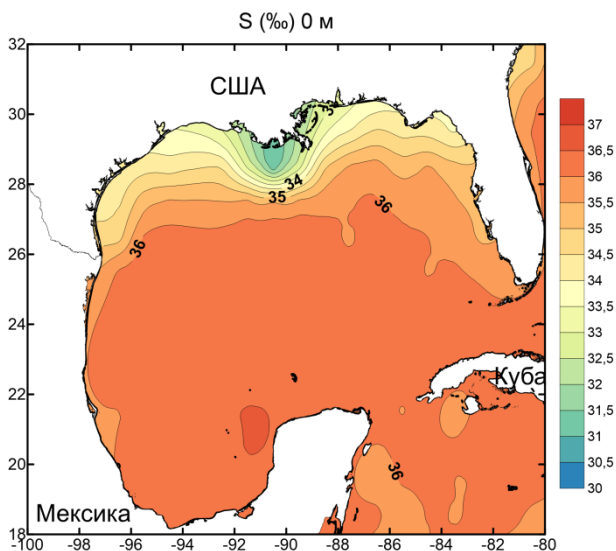


Рис. 5 – Середньорічна солоність води  $S$  (‰) для періоду 2005-2017 рр.

Fig. 5 – Average annual  $S$  (‰) in 2005-2017

Аналіз вертикального розподілу  $S$  демонструє, що розташування шару підповерхневого максимуму (нижньої межі галокліна) знаходиться на глибинах 100-200 м і в різних частинах затоки його положення неоднакове. Максимальна  $S$  в точках, в яких будувалися графіки розподілу (рис. 4), становить 36,4-36,7 ‰. Нижче галокліна розташований шар зі значним зменшенням  $S$ , він тягнеться до глибини близько 300-400 м. Глибше величина градієнта  $S$  зменшується. Між глибинами від 700-800 м до 1200-1400 м відбувається незначне зростання  $S$ , нижче розташований однорідний шар вод з  $S$  34,9-35,0 ‰.

Необхідно додати, що в точці 3, розташованій в затоці Кампаче, крім максимуму солоності, який знаходиться на глибині 25 м і дорівнює

36,45 ‰, спостерігається вторинний максимум на глибині 95 м, зі значенням 36,41 ‰.

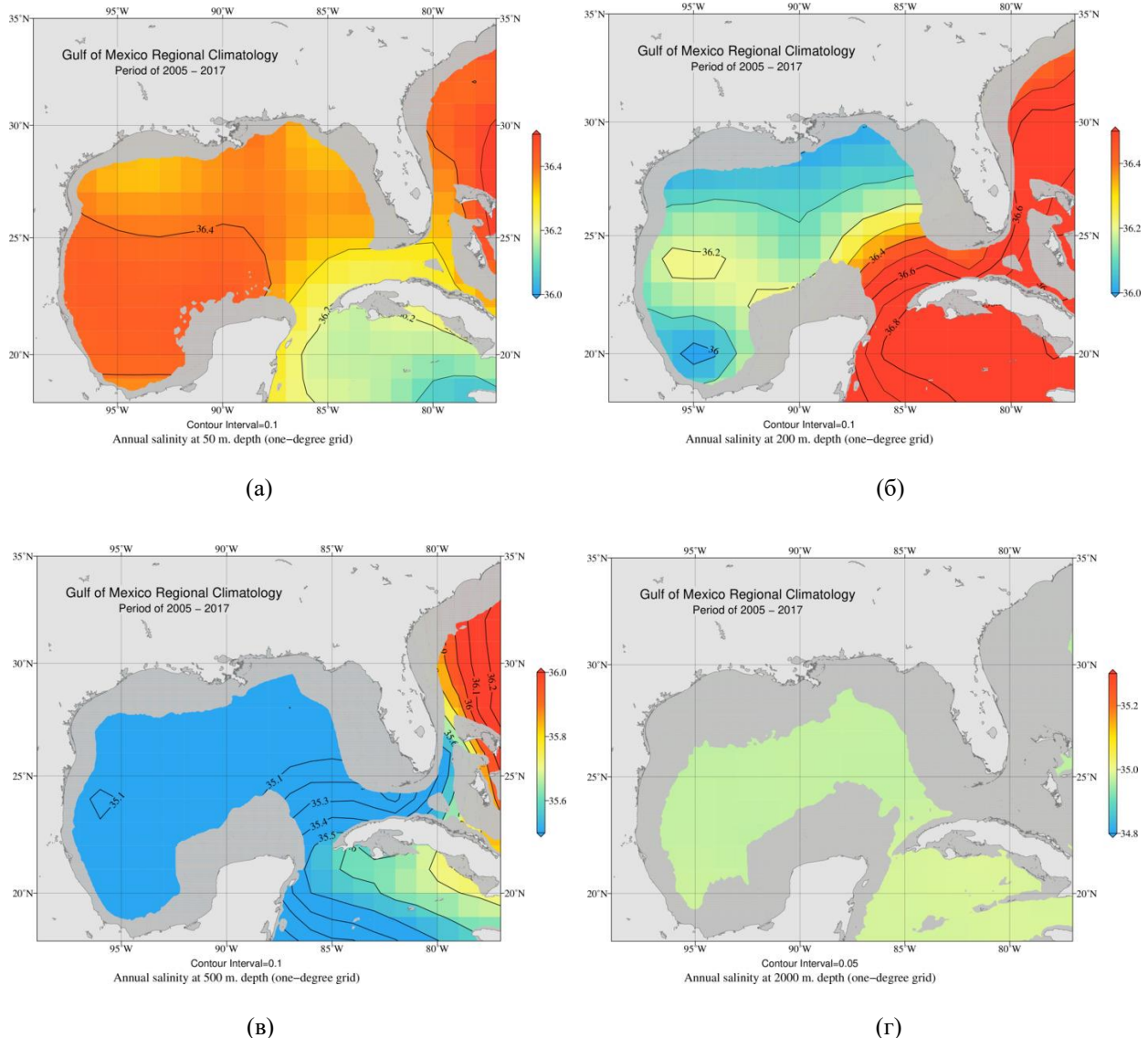
У тих областях, де солоність поверхневих вод підвищена, з глибиною відбувається деяке її зменшення. В районах розпріснених поверхневих вод солоність підвищується з глибиною.

Мексиканська затока розташована в субтропічній зоні, де знаходиться зона максимальної солоності, що збігається з областю негативного прісного балансу. Вода з високою солоністю формується в зоні Азорського максимуму атмосферного тиску і пасатів, де найбільш сприятливі умови для сильного випаровування. Низхідні рухи в антициклоні перешкоджають утворенню хмарності; прозора атмосфера сприяє сильному прогріванню води сонцем, а стійкі пасатні вітри постійно виносять вологу, яка випарувалася. В результаті тут влітку випаровується шар до 8 мм на добу, або до 3 м на рік. Це може призводити до підвищення солоності поверхневих вод до 37,9 ‰. Але необхідно відмітити, що води, які потрапляють до Мексиканської затоки з Карибського моря, частково складаються з вод Північної екваторіальної течії Північноатлантичного субтропічного кругообігу і, частково, Південної екваторіальної течії Південноатлантичного субтропічного кругообігу. Ці води теплі і солоні, однак, вода верхнього шару Південноатлантичного субтропічного кругообігу стає прісною через приплив великих опадів при протіканні через екваторіальний регіон, і через приплив великої кількості прісної води з Амазонки, Оріноко та інших річок уздовж північного узбережжя Південної Америки [22]. Це можна побачити на рисунку 6а, де видно, що на глибині 50 м солоність вод у Карибському морі на 0,2 ‰ нижча, ніж у Мексиканській затоці та в Атлантичному океані біля Багамських островів. На глибині 200 м (рис. 6б) води затоки менш солоні ніж в сусідніх районах Атлантики і Карибського моря, а осередки підвищеної та зниженої солоності відповідають розташуванню антициклонічного та циклонічного кругообігів в західній частині затоки [2]. На глибині 500 м і нижче (рис. 6в, г) поле солоності в затоці має однорідний характер.

Широтний розподіл солоності на поверхні затоки викликаний двома основними факторами – розподілом радіаційного балансу (високі значення якого сприяють значному випаровуванню, що призводить до збільшення солоності), а також прісним річковим стоком (низькі значення солоності уздовж узбережжя США, з мінімумом в районі дельти Міссісіпі).

Необхідно додати, що горизонтальний розподіл температури, солоності і густини води





**Рис. 6** – Просторовий розподіл солоності (‰) на глибинах: (а) – 50 м, (б) – 200 м, (в) – 500 м, (г) – 2000 м [19]  
**Fig. 6** – Spatial distribution of  $S$  (‰) at depths: (a) – 50 m, (б) – 200 m, (в) – 500 m, (г) – 2000 m [19]

визначається, головним чином, системою циркуляції вод [2, 4, 5]. Тільки в самому верхньому шарі деякі особливості в розподілі цих елементів пов'язані із зовнішнім тепловим балансом, втратою води при випаровуванні та її припливу за рахунок опадів і річкового стоку.

## 6. ВИСНОВКИ

1. Аналіз показав, що у Мексиканській затоці в 2005-2017 рр. просторовий розподіл  $SST$  демонструє її зниження з півдня на північ. Найбільша її величина ( $27,3^{\circ}C$ ) відзначається біля північно-західних берегів Куби та у прибережній зоні затоки Кампече, найменша  $SST$  ( $23,8^{\circ}C$ ) спостерігається в затоці Бухта Аппалачі, розташованої у північно-східній частині затоки.

Порівняння розподілу середньорічної  $SST$  в 1985-2017 рр. відносно 1955-1984 рр. показало, що найбільше підвищення  $SST$  спостерігається у північній, північно-східній і північно-західній частинах затоки (до  $2,9^{\circ}C$ ). Зменшення  $SST$  відзначається в центральній, західній частинах Мексиканської затоки та в південно-східній частині затоки Кампече (до  $-1,3^{\circ}C$ ).

2. У зимовий період відзначаються значні горизонтальні градієнти  $SST$ , в той час як в теплий період року поле температури має більш однорідний характер. Мінімальна середньомісячна  $SST$  відзначається в січні ( $14,6^{\circ}C$ ), максимальна – в вересні ( $30,6^{\circ}C$ ). Найбільш чітко сезонні зміни  $SST$  виражені в водах північної частини акваторії Мексиканської затоки біля берегів США, де амплітуда річного ходу досягає  $15,7^{\circ}C$ , на відміну

від півдня затоки, де амплітуда становить близько 5° С.

3. Розподіл температури води з глибиною демонструє, що квазіоднорідний шар поширюється до глибини 20-50 м. Нижче розташований термоклін, який поширюється до глибини 150-300 м. Нижче рівня 900-1300 м залягають глибинні води, температура яких становить близько 5° С.

4. Розподіл середньорічної солоності на поверхні на більшій частині акваторії Мексиканської затоки має однорідний характер зі значеннями близько 36,0-36,5 ‰. Тільки в північній частині, особливо в районі де в затоку впадають води річки Міссісіпі, величина солоності має мінімальні значення (менше 32 ‰).

5. Вертикальний розподіл солоності демонструє, що розташування шару підповерхневого максимуму знаходиться на глибинах 100-200 м і в різних частинах затоки його положення неоднакове. Максимальна солоність становить 36,4-36,7 ‰. Нижче галокліна розташований шар зі значним зменшенням солоності, він тягнеться до глибини близько 300-400 м. На глибинах нижче 1200-1400 м розташований однорідний шар вод з солоністю 34,9-35,0 ‰.

6. На формування режиму температури і солоності значного впливу надає радіаційний баланс, зміна якого простежується в широтній зміні цих величин на поверхні затоки, а також у характері їх сезонної зміни.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Суховей В. Ф., Коротаев Г. К., Шапиро Н. Б. Гидрология Карибского моря и Мексиканского залива. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. 183 с.
2. Sturges W., Leben R. R. Frequency of ring separations for the loop current in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*. 2000. Vol. 30. Pp. 1814-1819.
3. Mooers C. N. K., Maul G. A. Intra-Americas sea circulation. *The sea: The global coastal ocean. Regional studies and syntheses* / Edited by A. R. Robinson. New York: John Wiley and Sons, 1998. Pp. 183-208.
4. Sturges W., Lugo-Fernandez A. Circulation in the Gulf of Mexico: over most of the Gulf observations and models. Washington: AGU, 2005. 347 p.
5. Seasonal upwelling on the Western and Southern Shelves of the Gulf of Mexico / Zavala-Hidalgo J., Gallegos-García A., Martínez-López B. et al. *Ocean Dynamics*. 2006. 56. Pp. 333-338. <https://doi.org/10.1007/s10236-006-0072-3>
6. Kumpf H., Steidinger K., Sherman K. The Gulf of Mexico large marine ecosystem: Assessment, sustainability, and management. Malden: Blackwell Science, 1999. 704 p.
7. Gulf 360: State of the Gulf of Mexico. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies / Yoskowitz D., Leon C., Gibeaut J. et al. Texas: A&M University-Corpus Christi, 2013. 52 p.
8. Weather Atlas. URL: <https://www.weather-us.com/en/florida-usa/key-west-climate#rainfall>

(Accessed: 11.11.2021)

9. Royer T. V. Stoichiometry of nitrogen, phosphorus, and silica loads in the Mississippi-Atchafalaya River basin reveals spatial and temporal patterns in risk for cyanobacterial blooms. *Limnology and Oceanography*. 2020. 65(2). Pp. 325-335. <https://doi.org/10.1002/lno.11300>
10. Ward C. H., Tunnell J. W. Habitats and biota of the Gulf of Mexico: An overview. *Habitats and biota of the Gulf of Mexico: Before the deepwater horizon oil spill* / Edited by Ward C. New York: Springer, 2017. Pp. 1-54 [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3447-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3447-8_1)
11. Ward M., Harris P. M., Ward A. K. Gulf coast rivers of the Southeastern United States. *Rivers of North America*. / Edited by Benke A. C., Cushing C. E. London: Academic Press, 2005. Pp. 124-178. <https://doi.org/10.1016/B978-012088253-3/5000>
12. del Monte-Luna P., Villalobos H., Arreguin-Sanchez F. Variability of sea surface temperature in the southwestern Gulf of Mexico. *Continental Shelf Research*. 2015. Vol. 102. Pp. 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.04.017>
13. Evidence of multidecadal climate variability and the Atlantic multidecadal oscillation from a Gulf of Mexico sea-surface temperature-proxy record / Poore R. Z. et al. *Geo-Mar. Lett.* 2009. 29. Pp. 477-484. <http://dx.doi.org/10.1007/s00367-009-0154-6>
14. Zavala-Hidalgo J., Pares-Sierra A., Ochoa J. Seasonal variability of the temperature and heat fluxes in the Gulf of Mexico. *Atmosfera*. 2002. 15. Pp. 81-104.
15. Turner R. E., Rabalais N. N., Justic D. Trends in summer bottom-water temperatures on the northern Gulf of Mexico continental shelf from 1985 to 2015. *PLoS One*. 2017. 12(9): e0184350. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184350>
16. Hiddink J. G., Burrows M. T., Molinos J. G. Temperature tracking by North Sea benthic invertebrates in response to climate change. *Global Change Biology*. 2015. 21. Pp. 117-129. <https://doi.org/10.1111/gcb.12726>
17. Turner R., Rabalais N. The Gulf of Mexico. *World Seas: an Environmental Evaluation*. Volume I: Europe, The Americas and West Africa / Edited by C. Sheppard. London: Academic Press, 2019. Pp. 445-464. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805068-2.00022-X>
18. Charge-Free Mixing Entropy Battery Enabled by Low-Cost Electrode Materials / Ye M. et al. *ACS Omega*. 2019. Vol. 4 (7). Pp. 11785-11790. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00863>
19. The Gulf of Mexico regional climatology version 2. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/gulf-of-mexico-climate/gulf-data.html> (Accessed: 09.03.2021)
20. Gulf of Mexico regional climatology version 2 (NCEI Accession 0222571). NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset / Seidov D., Mishonov A. V., Boyer T. P. et al. <https://doi.org/10.25921/4sxe-ay54>
21. World Ocean database 2018. NOAA Atlas NESDIS 87 / Boyer T. P., Baranova O. K., Coleman C. et al. URL: [https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2020-04/wod\\_intro.pdf](https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2020-04/wod_intro.pdf) (Accessed: 07.05.2021)
22. Dong S. Intra-Americas Sea Ocean Nowcast / Forecast System. Evaluation against CTD. URL: [https://www7320.nrlssc.navy.mil/IASNFS\\_WWW/IASNFS\\_ctd.html](https://www7320.nrlssc.navy.mil/IASNFS_WWW/IASNFS_ctd.html) (Accessed: 27.07.2021)

## REFERENCES

1. Sukhovey, V.F., Korotaev, G.K. & Shapiro, N.B. (1980). *Gidrologiya Karibskogo morya i Meksikanskogo zaliva [Hydrology of the Caribbean and the Gulf of Mexico]*.

- Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ)
2. Sturges, W. & Leben, R.R. (2000). Frequency of ring separations for the loop current in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 30, pp. 1814-1819
  3. Mooers, C.N.K. & Maul, G.A. (1998). Intra-Americas sea circulation. In: A.R. Robinson (ed.). *The sea: The global coastal ocean. Regional studies and syntheses*. New York: John Wiley and Sons
  4. Sturges, W. & Lugo-Fernandez, A. (2005). *Circulation in the Gulf of Mexico: over most of the Gulf observations and models*. Washington: AGU
  5. Zavala-Hidalgo, J., Gallegos-García, A., Martínez-López, B. et al. (2006). Seasonal upwelling on the Western and Southern Shelves of the Gulf of Mexico. *Ocean Dynamics*, 56, pp. 333-338. <https://doi.org/10.1007/s10236-006-0072-3>
  6. Kumpf, H., Steidinger, K. & Sherman K. (1999). *The Gulf of Mexico large marine ecosystem: Assessment, sustainability, and management*. Malden: Blackwell Science.
  7. Yoskowitz, D., Leon, C., Gibeau, J., Lupher, B. et al. (2013). *Gulf 360: State of the Gulf of Mexico*. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Texas: A&M University-Corpus Christi.
  8. *Weather Atlas*. Available at: <https://www.weather-us.com/en/florida-usa/key-west-climate#rainfall> (accessed 11 November 2021)
  9. Royer, T.V. (2020). Stoichiometry of nitrogen, phosphorus, and silica loads in the Mississippi-Atchafalaya River basin reveals spatial and temporal patterns in risk for cyanobacterial blooms. *Limnology and Oceanography*, 65(2), pp. 325-335. <https://doi.org/10.1002/lno.11300>
  10. Ward, C.H. & Tunnell, J.W. (2017). Habitats and biota of the Gulf of Mexico: An overview. In: Ward, C. (ed.). *Habitats and biota of the Gulf of Mexico: Before the deepwater horizon oil spill*. New York: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3447-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3447-8_1)
  11. Ward, M., Harris, P.M. & Ward, A.K. (2005). Gulf coast rivers of the Southeastern United States. In: Benke, A.C., Cushing, C.E. (eds). *Rivers of North America*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012088253-3/5000>
  12. del Monte-Luna, P., Villalobos, H. & Arreguin-Sanchez, F. (2015). Variability of sea surface temperature in the southwestern Gulf of Mexico. *Continental Shelf Research*, 102, pp. 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.04.017>
  13. Poore, R.Z., DeLong, K.L., Richey, J.N. & Quinn, T.M. (2009). Evidence of multidecadal climate variability and the Atlantic multidecadal oscillation from a Gulf of Mexico sea-surface temperature-proxy record. *Geo-Mar. Lett.*, 29, pp. 477-484. <http://dx.doi.org/10.1007/s00367-009-0154-6>
  14. Zavala-Hidalgo, J., Pares-Sierra, A. & Ochoa, J. (2002). Seasonal variability of the temperature and heat fluxes in the Gulf of Mexico. *Atmosfera*, 15, pp. 81-104.
  15. Turner, R.E., Rabalais, N.N. & Justic, D. (2017). Trends in summer bottom-water temperatures on the northern Gulf of Mexico continental shelf from 1985 to 2015. *PLoS One*, 12(9), e0184350. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184350>
  16. Hiddink, J.G., Burrows, M.T. & Molinos, J.G. (2015). Temperature tracking by North Sea benthic invertebrates in response to climate change. *Global Change Biology*, 21, pp. 117-129. DOI:10.1111/gcb.12726
  17. Sheppard, C. (ed.). (2019). *The Gulf of Mexico. In: World Seas: an Environmental Evaluation*. Volume I: Europe, The Americas and West Africa. London: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805068-2.00022-X>
  18. Ye, Met al. (2019). Charge-Free Mixing Entropy Battery Enabled by Low-Cost Electrode Materials. *ACS Omega*, 4(7), pp. 11785-11790. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00863>
  19. *The Gulf of Mexico Regional Climatology version 2*. Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/access/gulf-of-mexico-climate/gulf-data.html> (accessed 9 March 2021)
  20. Seidov, D., Mishonov, A.V., Boyer, T.P. et al. (2020). *Gulf of Mexico regional climatology version 2 (NCEI Accession 0222571)*. NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset. Available at: <https://doi.org/10.25921/4sxe-ay54> (accessed 7 May 2021)
  21. Boyer, T.P., Baranova, O.K., Coleman, C. et al. (2018). *World Ocean Database 2018*. NOAA Atlas NESDIS 87. Available at: [https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2020-04/wod\\_intro.pdf](https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2020-04/wod_intro.pdf) (accessed 7 May 2021)
  22. Dong, S. (2020). *Intra-Americas Sea Ocean Nowcast / Forecast System. Evaluation against CTD*. Available at: [https://www7320.nrlssc.navy.mil/IASNFS\\_WWW/IASNFS\\_ctd.html](https://www7320.nrlssc.navy.mil/IASNFS_WWW/IASNFS_ctd.html) (accessed 27 July 2021)

## VARIABILITY OF THERMOHALINE REGIME OF SEE WATER OF THE GULF OF MEXICO IN 2005-2017

**Yu. El Hadri, N. A. Berlinsky, D. Yu. Volkov, M. O. Slizhe**

*Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, [magribinets@ukr.net](mailto:magribinets@ukr.net)*

The Gulf of Mexico is a large, productive, marine and coastal ecosystem providing the coastal residents and neighbouring regions with goods and services. The Gulf of Mexico's water area plays a significant role in shaping the climate across the coastal zone and the thermal state of the region's water also has a major impact on development of atmospheric processes over the Atlantic and Europe. Long-term climate variability throughout the Gulf of Mexico may affect both the strength of the Gulf Stream and heat transfer patterns within the ocean and the economic activity and environmental stability of the entire Northwest Atlantic Region. This work aims at determining the characteristics of variability of temperature regime and salinity of the Gulf of Mexico over recent decades.

The study was conducted based on the Gulf of Mexico Regional Climatology (GOM RC) data, version 2, available at the website of the NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI). It analyzes the temperature and salinity values at different depths for the period of 2005-



2017. According to the analysis, over 2005-2017 the spatial distribution of the average annual water temperature on the Gulf of Mexico's surface demonstrates its decrease from south to north. Its highest value is observed next to the northwestern coast of Cuba and along the coastal area of the Bay of Campeche, and the lowest temperature is observed at Apalachee Bay located in the northeastern part of the Gulf of Mexico. Though significant horizontal temperature gradients are observed in winter, during the warm period the temperature field is more homogeneous. The minimum average monthly water temperature on the surface is observed in January, the maximum one – in September. The most distinct seasonal changes in temperature are observed in the water of the northern part of the Gulf of Mexico next to the United States' coast. The distribution of average annual salinity of the most of the Gulf of Mexico is homogeneous with the exception of its northern part, especially in the area where the Mississippi River water flows into it, where salinity decreases sharply. Graphs of water temperature and salinity distribution at different depths across different areas of the gulf were constructed in order to determine the water stratification.

**Keywords:** the Gulf of Mexico, temperature, salinity, stratification

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМОХАЛИННОГО РЕЖИМА ВОД МЕКСИКАНСКОГО ЗАЛИВА В 2005-2017 ГГ.

Ю. Эль Хадри, Н. А. Берлинский, Д. Ю. Волков, М. А. Слиже

*Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [magribinets@ukr.net](mailto:magribinets@ukr.net)*

Мексиканский залив является крупной, продуктивной, морской и прибрежной экосистемой, которая обеспечивает товарами и услугами жителей побережья, а также соседние регионы. Воды залива играют значительную роль в формировании климата не только в прибрежных районах, тепловое состояние вод данного региона также оказывает несомненное влияние на развитие атмосферных процессов над Атлантикой и Европой. Долгосрочная изменчивость климата в регионе Мексиканского залива может повлиять на силу Гольфстрима и переноса тепла в океане, а также на экономическую активность и экологическую стабильность всей Северо-Западной Атлантики. Целью данной работы является определение особенностей изменчивости режима температуры и солености вод Мексиканского залива в последние десятилетия.

Исследование проводилось на основе данных региональной климатологии Мексиканского залива (GOM RC) версия 2, полученных с сайта Национальных центров экологической информации (NCEI) NOAA, были использованы значения температуры и солености воды на разных глубинах за период 2005-2017 гг. Анализ показал, что в Мексиканском заливе в 2005-2017 гг. пространственное распределение среднегодовой температуры воды на поверхности демонстрирует ее снижение с юга на север. Наибольшая ее величина отмечается у северо-западных берегов Кубы и в прибрежной зоне залива Кампече, наименьшая температура – в заливе Бухта Аппалачи, расположенном в северо-восточной части Мексиканского залива. В зимний период наблюдаются значительные горизонтальные градиенты температуры, в теплый период поле температуры имеет более однородный характер. Минимальная среднемесячная температура воды на поверхности отмечается в январе, максимальная в сентябре. Наиболее четко сезонные изменения температуры выражены в водах северной части акватории Мексиканского залива у берегов США. Распределение среднегодовой солености на большей части акватории Мексиканского залива имеет однородный характер, только в северной части залива, особенно в районе, где в залив впадают воды реки Миссисипи, величина солености резко уменьшается. Для определения стратификации вод были построены графики распределения температуры и солености воды на разных глубинах в разных районах залива.

**Ключевые слова:** Мексиканский залив; температура; соленость; стратификация.

*Подання до редакції : 10. 08. 2021  
Надходження остаточної версії : 17. 11. 2021  
Публікація статті : 26. 11. 2021*