

ПАС-КОРДОН К.Е.¹ (<https://orcid.org/0009-0009-6673-6751>)

ОКОЛОДКОВ Ю.Б.^{2*} (<https://orcid.org/0000-0003-3421-3429>)

КОБО-ГРАДИН Ф.³ (<https://orcid.org/0000-0001-5684-266X>)

¹ Інститут гідробіологічних досліджень, Центр морських досліджень і аквакультури,
Університет Сан-Карлос-де-Гватемала (IIN-CEMA-USAC), м. Гватемала, Гватемала

² Інститут морських наук і рибальства, Університет Веракрузана (ICIMAR-UV),
Бока-дель-Ріо, Веракрус, Мексика

³ Університет Сантьяго де Компостела (USC), Понтеведра, Галісія, Іспанія

* yuriokolodkov@yahoo.com

ШКІДЛИВЕ «ЦВІТІННЯ» ВОДИ, СПРИЧИНЕНЕ ДИНОФЛАГЕЛЯТАМИ В ТИХОМУ ОКЕАНІ БІЛЯ ГВАТЕМАЛИ (2019–2022 рр.)

Реферат. Дослідження планктону в Гватемалі пов'язані з випадками шкідливого «цвітіння» води (ШЦВ), спричиненого водоростями – продуцентами токсинів. У 1987 р. 193 людини отруїлися після вживання моллюсків, з них 22 людини померли. Як виявилось, це сталося через токсичного динофлагелята *Pyrodinium bahamense* var. *compressum* (Böhm) Steidinger, Tester & F.J.R.Taylor, яким харчувалися моллюски. В листопаді 2019 р. цей вид знову було зареєстровано в прибережній частині Тихого океану в Гватемалі. Його чисельність сягала 1×10^4 кл./л. У вересні 2020 р. було виявлено «цвітіння» *Margalefidinium polykrikoides* (Margalef) F.Gómez, Richlen & D.M.Anderson, чисельність його на вегетативній стадії була $1,24 \times 10^6$ кл./л, а цист – $1,53 \times 10^6$ кл./л. Масовий розвиток *Noctiluca scintillans* (Macartney) Kofoid & Swezy спостерігався в листопаді 2020 р. та березні 2021 р. ($1,2 \times 10^6$ кл./л). З січня по грудень 2021 р. на трьох ділянках акваторії перед портом Кецаль проводився щомісячний моніторинг (зразки відбирали планктонною сіткою з розміром комірки 25 мкм). У квітні

Надійшла до редакції 07.02.2024. Після доопрацювання 19.02.2024. Підписана до друку 10.03.2024.
Опублікована 20.03.2024

Ц и т у в а н н я . Пас-Кордон К.Е., Окологков Ю.Б., Кобо-Градин Ф. 2024. Шкідливе «цвітіння» води, спричинене динофлагелятами в Тихому океані біля Гватемали (2019–2022 рр.). *Альгологія*. 34(1): 3–19.
<https://doi.org/10.15407/alg34.01.003>

2022 р. у західному секторі гватемальського Тихого океану, зокрема в муніципалітеті Тікісате департаменту Ескуїнтла, було зафіксовано 11 випадків у людей із симптомами паралітичного отруєння моллюсками. У період з 3 по 27 травня 2022 р. ШЦВ спричинило смерть чотирьох та отруєння 34 людей у департаментах поблизу Мексики: Реталулеу (Чамперіко), Сан-Маркос (Тілапа) та Ескуїнтла (Тікісате, Буена-Віста та Ізапа). Максимальна концентрація сакситоксину була зафіксована біля Реталулеу (14 099 МО/100 г); до 7 липня 2022 р. сакситоксин продовжували виявляти в Тілапі та Тікісате (1021 МО/100 г). У шлунку моллюска *Tagelus* sp. (двостулкові: Solecurtidae) були виявлені клітини *P. bahamense*.

Ключові слова: «цвітіння» води, динофлагеляти, Гватемала, Тихий океан, міководорості, фітопланктон, *Pyrodinium bahamense*, сакситоксин, паралітичне отруєння моллюсками

Вступ

Гватемала — центральномексиканська країна, що омивається водами Тихого океану та Карибського моря, має найдовший кордон з Мексикою (958 км) на південний схід від неї; берегова лінія вздовж Тихого океану становить 300 км. З 1970 по 2016 рр. в Центральній та Південній Америці було зареєстровано понад 1410 випадків отруєння людей (включаючи 94 смерті) сакситоксином (СТК) та його аналогами, що виробляються деякими видами планктонних динофлагелят. Це призвело до паралітичного отруєння моллюсками (ПОМ). Найбільшу кількість отруєнь (819 випадків) спричинили *Pyrodinium bahamense* Plate, *Alexandrium* spp. (350 випадків) та *Gymnodinium catenatum* H.W.Graham (241 випадок) (Band-Schmidt et al., 2019).

Фактори навколишнього середовища, такі як циркуляція океану, атмосферні опади, вітри та водна стратифікація, змінюються зі зміною клімату та різними способами впливають на екологію шкідливого «цвітіння» водоростей (ШЦВ). Скупчення цист динофлагелят (бентосна стадія в життєвому циклі деяких видів) у міководних прибережних затоках зазвичай мають вищу температурну сезонність, ніж ті, що знаходяться в глибоких відкритих водах (Hoppenrath et al., 2014; Brosnahan et al., 2020).

Цистоутворення може обмежити інтенсивність розвитку цистоутворюючих видів незалежно від впливу факторів навколишнього середовища, таких як поживні речовини та сонячна радіація. Утворення нових цист важливо для оновлення популяції та її інтенсивного розвитку в майбутньому. Через їхню важливість для розуміння екологічних передумов

процесу «цвітіння» води дослідники десятиліттями намагалися описати процес утворення цист *in situ*, проте це дуже непросто.

Більшість випадків «цвітіння» води, викликаних іхтіотоксичним видом *Margalefidinium polykrikoides* (Margalef) F.Gómez, Richlen et D.M.Anderson (= *Cochlodinium polykrikoides* Margalef) у Північній і Центральній Америці, було зареєстровано вздовж узбережжя Тихого океану, включаючи Мексику та Коста-Ріку (Alonso-Rodriguez, 2004; Durán-Riveroll et al., 2019). Деякі з них спричинили загибель кількох видів риб.

У Гватемалі було проведено небагато досліджень морського фітопланктону, причому динофлагеляти є найбільш вивченою таксономічною групою. У 1987 р. спостерігалася важлива подія ШЦВ, коли 193 людини отруїлися після вживання молюсків, 22 випадки були летальними. Зокрема, повідомлялося про знахідки *Dinophysis caudata* Kent, *Gonyaulax verior* Sournia та *Pyrodinium bahamense* var. *compressum* (Böhm) Steidinger, Tester & F.J.R.Taylor як найпоширенішого виду (Paz-Cordón, 1997). В огляді, присвяченому ролі динофлагелят як агентів ШЦВ у Тихому океані біля Гватемали, вказано, що такі випадки зареєстровані у 1985, 1987, 1989, 1990, 1995, 2001 і 2005 рр. (Leiva, 2008). У грудні 2018 р. зареєстровано розвиток *P. bahamense* var. *compressum* із чисельністю 3×10^3 кл./л); біопроби на мишах засвідчили наявність сакситоксину (СТК) у кількості 8236 МО/100 г та 6559 МО/100 г (García-Pérez et al., 2018). У Карибському прибережжі Гватемали в таких екосистемах, як коралові рифи та зарості підводної рослинності, автори виявили потенційно токсичні бентосні динофлагеляти родів *Gambierdiscus* R.Adachi et Y.Fukuyo, *Prorocentrum* Ehrenb., *Coolia* A.Meunier та *Ostreopsis* Johs. Schmidt.

Метою роботи було дослідження випадків «цвітіння» води в Тихому океані біля узбережжя Гватемали в період 2019–2022 рр., основними збудниками яких були продуцент СТК *Pyrodinium bahamense* та іхтіотоксичний *Margalefidinium polykrikoides*. Якщо в 2019–2021 рр. не було зареєстровано випадків інтоксикації людей через ШЦВ і карантинні заходи не вводилися, то в 2022 р. від «цвітіння» постраждали 22 людини, з них четверо померли.

Матеріали та методи

Район досліджень

На клімат Гватемали впливає її географічне положення в тропічній зоні Північної півкулі та велика різноманітність висот, що коливаються від рівня моря до 4220 м. Висотні варіації, а також вплив океану сприяють надзвичайній строкатості кліматичних умов; на даний момент на території

країни відомо близько 360 варіантів мікроклімату (Bardales-Espinoza et al., 2019). На відміну від чотирьох сезонів року в середніх широтах Гватемала має два чітко виражені сезони: дощовий (травень–жовтень) та сухий (листопад–квітень).

Сезон дощів починається в травні й погода в червні зазвичай хмарна та дощова. В цей період внутрішньотропічна зона конвергенції (ВТЗК) наближається до широт Гватемали. Північно-східні пасати приносять хмарні системи, що продукують інтенсивні дощі. У Гватемалі початок сезону дощів на більшій частині території пояснюється впливом атмосферних фронтів зі сходу, надходженням вологи на обидва узбережжя та наближенням до осі ВТЗК. Іноді ці східні фронти можуть стати тропічними циклонами та викликати проливні дощі (ICC, 2022; INSIVUMEN, 2022). У липні – на початку серпня через зміну пасатів і посилення антициклону в Мексиканській затоці настає сухий період, який називають собачими днями. Згодом, коли він слабшає та зникає, інтенсивні опади повертаються, завершуючи сезон дощів у вересні та жовтні (INSIVUMEN, 2022).

Під час сухого сезону атмосферний тиск підвищується й маси холодного повітря мігрують з полярної зони, спричиняючи зниження температури та збільшення швидкості вітру. Переважає північний вітер, а холодний сезон триває з листопада до лютого. Згодом температура підвищується і в березні та квітні виникають хвилі спеки. У цей період через вплив холодних фронтів можливі деякі локальні конвективні або префронтальні дощі (INSIVUMEN, 2022).

Відбір проб та лабораторні дослідження

Матеріалом для дослідження слугували проби, відібрані в період з жовтня 2019 р. по вересень 2022 р. у різних місцях тихоокеанського прибережжя Гватемали, де спостерігалось «цвітіння» води, включаючи акваторію порту Пуерто-Кетцаль та інші ділянки біля Пуерто Сан Хосе (рис. 1). Кількісні зразки фітопланктону відбирали з човна за допомогою 6,4 л пляшки Ван Дорна між 8:00 ранку та 12:00 дня, фіксували кислим розчином Люголя та зберігали в скляних пляшках Kimax-Kimble об'ємом 500 мл. Додатково в кожному місці відбору зразків проводили горизонтальне буксирування планктонної сітки з розміром комірки 25 мкм протягом 5 хв, а потім аналізували за допомогою інвертованого мікроскопа Premier, модель PW-BDS200, оснащеного об'єктивами LWD Plan 25x/0,40 та 40x/0,65 (Ningbo ProWay Optics & Electronics Co., Ltd., Китай). Клітини підраховували в 1 мл камері Седжвіка-Рафтера (Reguera et al., 2011).

Крім того, під час відбору зразків ми координували роботу з установами, які входять до складу Національної комісії з червоних припливів у Гватемалі, для проведення збору двостулкових молюсків, щоб гарантувати безпеку їхнього споживання людиною (рис. 1).

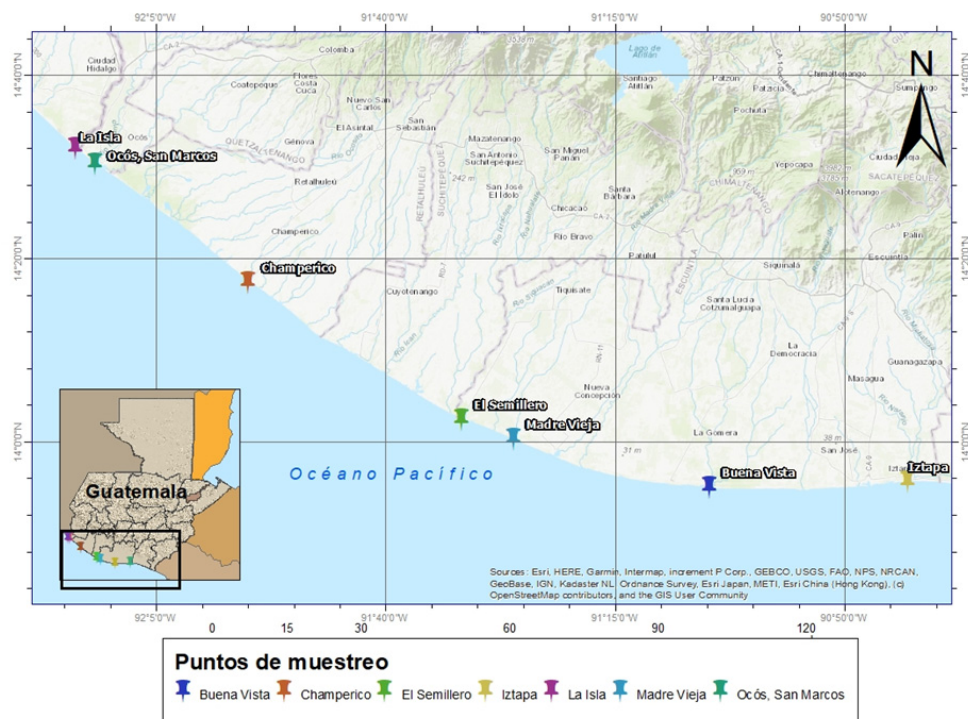


Рис. 1. Станції відбору проб двостулкових молюсків в період отруєнь людей після вживання двостулкових молюсків під час «цвітіння» *Pyrodinium bahamense* в Тихому океані Гватемали в травні–серпні 2022 р.

Мета цього збору полягала в кількісному визначенні присутності сакситоксину (STX) за допомогою офіційного методу аналізу 959.08.16 АОАС – Асоціації офіційних сільськогосподарських хіміків (AOAC, 2000), який використовує біотести на мишах (Comisión del Codex Alimentarius, 2017). Ці тести були проведені в Національній лабораторії охорони здоров'я завдяки співпраці з Управлінням правил рибальства та аквакультури Міністерства сільського господарства, тваринництва та продовольства (MAGA). Через пандемію COVID-19 відбір проб у 2020 р. проводився нерегулярно.

Результати

Періодичні спалахи «цвітіння» води, викликані *Margalefidinium polykrikoides* (цисти) та *Pyrodinium bahamense* var. *compressum*, відбувалися у 2019, 2020 (табл. 1) та 2021 рр. (табл. 2). Нижче в хронологічному порядку представлено відомості стосовно випадків ШЦВ, що фіксувалися в досліджуваній період, з точки зору чисельності клітин видів динофлагеллят, що викликали «цвітіння», та концентрації токсинів.

Таблиця 1. Результати аналізу сакситоксину в різних районах (ділянка, департамент) гватемальського сектору Тихого океану в різні місяці 2019–2020 рр. Визначено офіційним методом 959.08.16 АОАС (біотест на мишах)

| Дата відбору | Пуерто Сан-Хосе, Ескуїнтла | Пуерто Кецаль, Ескуїнтла | Лас Лісас, Санта Роза | Буена Віста, Ескуїнтла | Ізтапа, Ескуїнтла | Чамперіко, Реталулеу |
|--------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| 31.10.2019 | | 3275 | 178,5 | | | |
| 8.11.2019 | 1320,4 | 3037 | | | | |
| 11.11.2019 | | | | | | нв |
| 13.11.2019 | | | 200,7 | | | |
| 14.11.2019 | нв | | | | | нв |
| 15.11.2019 | | | | | 283,2 | |
| 19.11.2019 | | 1162,1 | | | | |
| 20.11.2019 | | | нв | 140,9 | | |
| 22.11.2019 | 5200,6 | | | | | |
| 28.11.2019 | | 426 | | | | |
| 31.01.2020 | | | | 156,2 | | |
| 11.02.2020 | | | | | | нв |
| 12.02.2020 | | | | | нв | |
| 24.09.2020 | | 159,6 | | нв | | |
| 29.09.2020 | | | нв | | | |
| 01.10.2020 | | | | | | нв |

Позначення: нв – не виявлено; пропуск – не досліджували.

Мікроскопічні дослідження в період 2019–2022 рр. виявили вегетативні клітини та цисти *Margalefidinium polykrikoides*, а також вегетативні клітини *Pyrodinium bahamense* var. *compressum*. Ці фотосинтезуючі види

історично відомі своїм внеском у «цвітіння» водоростей у центральній частині гватемальського сектору Тихого океану.

У листопаді 2019 р. чисельність *P. bahamense* var. *compressum* становила 10 кл./мл.

Таблиця 2. Чисельність вегетативних клітин (кл./л) *Margalefidinium polykrikoides* у Пуерто Кетцаль і Пуерто Сан Хосе та *Pyrodinium bahamense* в Пуерто Кетцаль у 2021 р.

| Місяць | <i>Margalefidinium polykrikoides</i> , Пуерто Кетцаль | <i>Margalefidinium polykrikoides</i> , Пуерто Сан Хосе | <i>Pyrodinium bahamense</i> , Пуерто Кетцаль |
|----------|--|---|---|
| Січень | $4,9 \times 10^4$ | $9,2 \times 10^4$ | 3×10^4 |
| Лютий | 4×10^5 | $8,2 \times 10^5$ | 0 |
| Березень | $2,5 \times 10^7$ | $1,2 \times 10^6$ | 0 |
| Квітень | $8,5 \times 10^4$ | $2,8 \times 10^6$ | 0 |
| Травень | $1,78 \times 10^5$ | $1,8 \times 10^5$ | 0 |
| Червень | $2,28 \times 10^5$ | $2,3 \times 10^5$ | 1×10^4 |
| Липень | — | — | — |
| Серпень | $3,9 \times 10^4$ | $3,9 \times 10^4$ | 0 |
| Вересень | $4,2 \times 10^4$ | $6,9 \times 10^4$ | 0 |
| Жовтень | $6,7 \times 10^4$ | $6,7 \times 10^4$ | 0 |
| Листопад | $1,6 \times 10^5$ | $5,1 \times 10^4$ | 0 |
| Грудень | 8×10^3 | 5×10^4 | $2,4 \times 10^5$ |

Позначення: «—» — відбір зразків не здійснювали.

2019 р. У жовтні та листопаді 2019 р. в акваторії Пуерто-Кетцаль були виявлені клітини *M. polykrikoides*, які утворювали ланцюжки з 3-4 клітин. Їхня чисельність досягала $7,8 \times 10^6$ кл./л. «Цвітіння» спричинило знебарвлення води та зміну її запаху, а також замор риби. Токсикологічний аналіз виявив присутність СТК (3,274 МО/100 г). *Pyrodinium bahamense* також розвивався у великій кількості в цьому змішаному «цвітінні» (до $3,9 \times 10^4$ кл./л).

2020 р. Наступний випадок «цвітіння» спостерігався у вересні 2020 р., коли показники чисельності як вегетативних клітин, так і цист *M. polykrikoides* досягали $1,24 \times 10^6$ кл./л та $1,53 \times 10^6$ кл./л відповідно. Дані про вміст СТК у двостулкових молюсках з деяких регіонів тихоокеанського узбережжя Гватемали в різні місяці 2020 р. наведено в табл. 1. Крім того, у листопаді 2020 р. в доку Пуерто-Кетцаль

спостерігалось біоломінісцентне «цвітіння» гетеротрофного нетоксичного динофлагелята *Noctiluca scintillans* (Macartney) Kof. et Swezy з чисельністю $1,1 \times 10^6$ кл./л. Це був перший кількісний звіт про цей вид у Гватемалі.

2021 р. У січні 2021 р. впроваджено щомісячний моніторинг фітопланктону на трьох ділянках відбору проб, розташованих на відстані 3–5 км від берега, з глибиною 1,5–5,0 м. У березні 2021 р. було виявлено «цвітіння» *M. polykrikoides* з чисельністю $1,2 \times 10^6$ кл./л. Протягом 2021 р. вегетативні клітини *M. polykrikoides* у Пуерто-Кетцалі та Пуерто-Сан-Хосе та *P. bahamense* у Пуерто-Кетцалі супроводжувалися великою кількістю цист ($1,53 \times 10^6$ кл./л) перед портом ($13^{\circ}55'7,53''\text{N}$, $90^{\circ}47'15.835''\text{W}$).

Протягом 2021 р. *M. polykrikoides* домінував у Пуерто-Кетцалі та Пуерто-Сан-Хосе, а *P. bahamense* – у Пуерто-Кетцалі (табл. 2).

2022 р. У квітні 2022 р. у західному секторі гватемальського Тихого океану, зокрема в муніципалітеті Тікісате департаменту Ескуінтла, було зафіксовано 11 випадків прояву симптомів ПОМ у людей. На жаль, в одному випадку споживання двостулкових молюсків, відомих як *Tagelus* sp. (*Bivalvia*: *Cardiida*: *Solecurtidae*), призвело до смерті 12-річного хлопчика (рис. 2). Пацієнти зі шлунково-кишковими розладами, властивими ПОМ, отримали медичну допомогу в лікарні Тікісате.

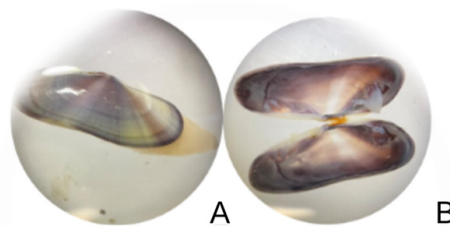


Рис. 2. Двостулковий молюск *Tagelus* sp., переносник сакситоксину в тихоокеанському прибережжі Гватемали. А: дорсальний вид правої стулки; В: внутрішній вигляд стулок

Національна лабораторія Міністерства охорони здоров'я Гватемали (MSPAS) провела тести на мишах, щоб визначити наявність СТК у вищезгаданих молюсків. Результати виявили максимальні рівні 7069,4 МО на 100 г, або 1413,9 мкг еквіваленту СТК на 100 г тканини молюсків у зразках, отриманих у муніципалітеті Тіквісате. Ці рівні перевищували межі, дозволені для споживання людиною, у 18 разів, згідно з національними та міжнародними правилами, які встановлюють максимум 400 МО на 100 г, або 80 мкг еквівалента СТК на 100 г тканини молюска (Moestrup, 2009). За результатами цих звітів, різні установи, включно з

Управлінням регулювання рибальства та аквакультури (DIPESCA) MAGA, Національним інститутом сейсмології, вулканології, метеорології та гідрології Гватемали (INSIVUMEN), MSPAS, Тихоокеанським військово-морським командуванням (CONAPAC) і CEMA-USAC, вирішили посилити епідеміологічний нагляд для виявлення можливих випадків отруєння. Це призвело до видачі червоного рівня тривоги Комісією із захисту населення.

CEMA-USAC відповідав за якісний аналіз зразків води, зібраних DIPESCA, хоча переконливих доказів присутності мікрowodоростей, що викликають хворобу, не було знайдено. Згодом було досліджено двостулкових молюсків *Tagelus* sp., ідентифікованих як збудників отруєння STX під час «цвітіння» водоростей. Родина *Solecurtidae*, до якої належить цей рід, характеризується наявністю квадратної витягнутої рівностулкової черепашки з шарніром, як правило, з двома кардинальними зубцями в кожній стулці, а також двома рубцями привідних м'язів неоднакової форми та глибоким мантийним синусом (Fischer et al., 1995).

Морфологічний аналіз десяти особин цього двостулкового молюска дозволив визначити середню довжину черепашки 21,57 мм і середню висоту 7,85 мм. Крім того, проведено аналіз вмісту шлунку, де виявлено клітини *P. bahamense* (рис. 3). MSPAS провів додатковий аналіз СТК, отримані результати показали максимум 7069,4 МО на 100 г тканини молюсків у Мадре-В'єха, Тікісате.

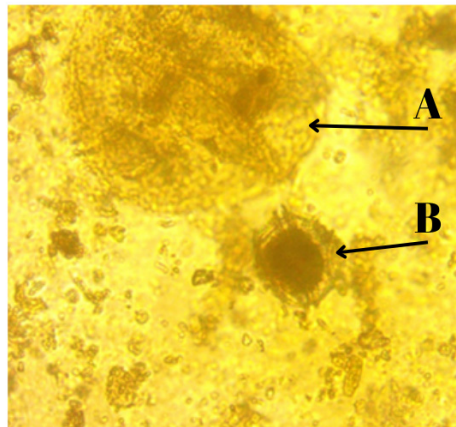


Рис. 3. Динофлагеляти, виявлені в шлунку молюску *Tagelus* sp. у Тікісате, Гватемала.

A: *Noctiluca scintillans*; B: *Pyrodinium bahamense*

20 травня 2022 р. повідомлено про отруєння 23 осіб, які отримали медичну допомогу в лікарні Тікісате (табл. 3). У всіх випадках спостерігалися шлунково-кишкові симптоми та неврологічні прояви після

споживання моллюсків. Згідно з епідеміологічним попередженням, оприлюдненим МСПАС, з 29 квітня по 20 травня зафіксовано 34 випадки отруєнь у людей віком від 5 до 59 років, з яких, на жаль, 4 людини померли.

Таблиця 3. Хронологія отруєнь людей після споживання двостулкових моллюсків з тихоокеанського прибережжя Гватемали у 2022 р.

| Дата | Місце відбору, муніципалітет/департамент | Концентрація СТК, МО/100 г | Вид-переносник |
|-----------|---|-------------------------------|------------------------|
| 3 травня | Мадре В'єха, Тікісате | 7 069,40 | <i>Tagelus</i> sp. |
| 3 травня | Ель Семільєро, Тікісате | 5 013,10 | <i>Tagelus</i> sp. |
| 5 травня | Ель Семільєро, Тікісате | 3 948,90 | <i>Tagelus</i> sp. |
| 11 травня | El Semillero, Тікісате | 2 316,60 | <i>Tagelus</i> sp. |
| 13 травня | Буена Віста, Ескуїнтла | 108 | <i>Anadara grandis</i> |
| 13 травня | Ізапа, Ескуїнтла | нв | Устриці |
| 26 травня | Плайя де ла Ісла, Сан Маркос | 12 686,00 | <i>Tagelus</i> sp. |
| 25 травня | Мадре В'єха, Тікісате | 14 099,00 | <i>Tagelus</i> sp. |
| 27 травня | Тілапа, Окос, Сан Маркос | 816 | <i>Tagelus</i> sp. |
| 27 травня | Чамперіко, Реталулеу | 115 | Устриці |
| 16 червня | Тілапа, Окос, Сан Маркос | 1 580,00 | <i>Tagelus</i> sp. |
| 19 червня | Ель Семільєро, Тікісате | 124 | <i>Tagelus</i> sp. |
| 27 липня | Плайя де ла Ісла, Сан Маркос | 163 | <i>Tagelus</i> sp. |
| 27 липня | Тілапа, Окос, Сан Маркос | 1 501,00 | <i>Tagelus</i> sp. |
| 16 серпня | Тілапа, Окос, Сан Маркос | 136 | <i>Tagelus</i> sp. |

П о з н а ч е н н я . нв – не виявлено.

Обговорення

Випадки ШЦВ у центральному секторі гватемальського Тихого океану в 2019–2022 рр., збудником яких був *M. polykrikoides*, виникали поблизу гирл річок, коли температура води підвищувалася в періоди слабких вітрів і низької концентрації поживних речовин. Схожі явища спостерігалися кількома дослідниками. «Цвітіння» не тільки збагачувало воду поживними речовинами, але й створювало градієнти вертикальної щільності та

температури, які сприяли стабільності водної товщі, створюючи сприятливі умови для виживання та розвитку *M. polykrikoides* (Alonso-Rodríguez, 2004). В роботі філіппінських дослідників (Azanza, Baula, 2005) «цвітіння» цього динофлагелята також пов'язує з високою концентрацією поживних речовин, спричиненою впливом дощу та вітру. Таким чином, припускають, що інтенсивний розвиток мікроводоростей залежить від концентрації розчинених поживних речовин і гідродинамічних характеристик досліджуваної території.

Аутекологія *P. bahamense* тісно пов'язана з динамікою чисельності його спочиваючих цист, розташуванням лож цист і температурою води в регіоні. На досліджуваній території ці умови є сприятливими для його зростання протягом більшої частини року, хоча вид може бути відсутнім у товщі води протягом тривалого часу. В Азії «цвітіння» цього виду відбувається більш спорадично, іноді з клітинами, присутніми цілий рік або з кількома піками протягом року (Azanza et al., 2001). У південній частині Мексиканської затоки їх присутність спостерігається протягом усього року, тоді як у Каліфорнійській затоці популяції більш сезонні (Brosnahan et al., 2020).

Численні дослідження засвідчують роль цист в екології динофлагелят: вони діють як посівний матеріал для розвитку планктонних популяцій. Тому майже повна відсутність життєздатних цист токсичних і потенційно токсичних динофлагелят *Gymnodinium catenatum* H.W.Graham, *Lingulodinium polyedra* (F.Stein) J.D.Dodge і *Prorocentrum reticulatum* (Clap. et Lachm.) Bütschli виключає утворення їх значних відкладів, отже планктонні популяції повинні залежати від інших джерел інокуляції (García-Moreiras et al., 2021). Дослідження *Alexandrium catenella* (Whedon et Kofoid) Balech і *P. bahamense* значно розширили наші знання про роль бентосних зв'язків в екології фітопланктону. Наприклад, за розташуванням бентосних скупчень спочиваючих цист динофлагелят, які накопичуються у відкладах, часто можна визначити, де відбудеться спалах «цвітіння» (Brosnahan et al., 2020; García-Moreiras et al., 2021).

У цист *A. catenella* та *P. bahamense* існує два різних типи періоду спокою. Перший, так званий обов'язковий спокій, пов'язаний із періодом дозрівання, необхідного для проростання цисти, відбувається відразу після її утворення (Anderson, Morel, 1979). Другий, відомий як вторинний стан спокою, є оборотним станом, який лежить в основі циклу спокою й може повторюватися багато разів протягом життя цисти. Було показано, що тривалість вторинного спокою визначається температурою (Moore et al., 2008; Brosnahan et al., 2020). Гіпотеза «вікна можливостей» (Moore et al., 2008) може передбачити більш раннє та тривале «цвітіння», оскільки

температури стають дедалі сприятливішими для росту та поділу планктонних вегетативних клітин (Brosnahan et al., 2020).

Низка видів динофлагеллят відповідальна за явища ШЦВ; багато з цих видів виробляють спочиваючі цисти, що перебувають у стані спокою, доки зберігаються несприятливі умови. Ці явища можуть бути пов'язані з різними загрозами для прибережних екосистем, такими як отруєння людей через споживання двостулкових молюсків або зміна кольору води.

Цистоутворення може обмежити посилення «цвітіння» цистоутворюючих видів, незалежно від таких факторів, як неорганічні поживні речовини та світло. Утворення нових цист є важливим для оновлення їх запасів та початку майбутнього «цвітіння» (Brosnahan et al., 2017). Через їхню важливість для екології «цвітіння» вже тривалий час продовжуються спроби дослідити утворення нових цист *in situ*; такі спостереження дуже утруднені. Гамети та планозиготи, попередники планктонної статеві стадії нових цист, є короточасними та відносно рідкісними порівняно з вегетативними клітинами в популяціях, які викликають «цвітіння» (Hallegraeff et al., 2003). Тому більшість описів процесу цистоутворення отримані в результаті лабораторних спостережень.

За даними INSIVUMEN (2022), накопичена кількість опадів у жовтні 2021 р. перевищила історичну медіану в Бока-Коста (департамент Ескуінтла в гватемальському Тихому океані) головним чином через проходження трьох тропічних хвиль: двох холодних фронтів і наближення ВТЗК. Проте в Тихому океані були деякі райони з накопиченими мінімумами (ICC, 2022).

Відповідно до прогнозів, опублікованих Центром прогнозування клімату (Національна служба погоди, NOAA, США; <https://www.spc.ncep.noaa.gov/>) та Міжнародним науково-дослідним інститутом кліматичного суспільства (Кліматична школа Колумбійського університету, Нью-Йорк, США; <https://www.climate.columbia.edu/>), у квітні 2022 р. були виявлені ознаки слабкої Ла-Ніньї. У період з квітня по червень було зафіксовано зниження температури поверхні моря приблизно на $-0,7$ °C, що вказує на сталу присутність Ла-Ніньї. За квартал з травня по липень було оцінено 61% ймовірності умов Ла-Ніньї, тоді як нейтральні умови мали 39%-ну ймовірність (INSIVUMEN, 2022). Крім того, для кварталу з червня по серпень прогнозується ймовірність 49% для умов Ла-Ніньї, 49% для нейтральних умов і лише 2% для умов Ель-Ніньо. Моделі, пов'язані з феноменом південного коливання Ель-Ніньо (ПКЕН), припускали, що умови Ла-Ніньї зберігатимуться до кінця 2022 р. (INSIVUMEN, 2022).

Співставлення даних про показники біомаси *P. bahamense* з циклами Ель-Ніньо/Ла-Нінья (ПКЕН) свідчать про тісний зв'язок між максимальною біомасою *P. bahamense* та періодами Ель-Ніньо з великою кількістю опадів; цей зв'язок функціонально пов'язаний із позитивною кореляцією між концентрацією поживних речовин і атмосферними опадами (Phlips et al., 2011, 2020). Усі ці процеси можуть посилюватися рясними опадами, хоча відносна важливість того чи іншого джерела надходження може змінюватися залежно від типу поживних речовин. Наприклад, внесок атмосфери в неточкове надходження азоту значно більший (32–53%), ніж у постачання фосфору (4–13%) (Gao, 2009).

Хоча в нашому дослідженні біомасу *P. bahamense* не визначали, високі концентрації СТК, виявлені в травні–липні 2022 р. вздовж гватемальського прибережжя Тихого океану (табл. 2), свідчать про високу кількість клітин і високу біомасу виду (ці дані недоступні на сайтах заходів ШЦВ). Однак, як випливає з кліматичних даних (INSIVUMEN, 2022), цей випадок, швидше за все, стався в період Ла-Нінья, що, здається, суперечить цитованій вище літературі. Однак, період з високими концентраціями СТК добре збігається з сезоном дощів на території дослідження.

Також відомо, що не лише цикли Ель-Ніньо/Ла-Нінья, але й довгострокові цикли/коливання, такі як Північноатлантичне коливання (NAO) і Тихоокеанське десятирічне коливання (PDO), можуть впливати на розвиток видів, що спричиняють ШЦВ (Glibert, Burkholder, 2018).

Заключення

У період між 2019 і 2022 роками в Тихому океані біля узбережжя Гватемали було виявлено два домінуючі фотосинтезуючі потенційно токсичні види динофлагелят: іхтіотоксичний *Margalefidinium polykrikoides* і продуцент СТК *Pyrodinium bahamense*. Крім того, зареєстровано перше кількісно оцінене «цвітіння» гетеротрофного нетоксичного динофлагелята *Noctiluca scintillans*. У квітні–травні 2022 р. сталася критична подія, пов'язана з паралітичним отруєнням молюсками, спричиненим сакситоксином, і вона, ймовірно, була пов'язана з Ла-Нінья. Цей токсин було виявлено за допомогою біологічного аналізу на мишах і його походження приписали *P. bahamense*. Переносником був молюск *Tagelus* sp. Ця подія торкнулася 23 людей, четверо з них загинули. У відповідь було оголошено епідеміологічне попередження, яке призвело до заборони споживання молюсків.

Подяки

Автори вдячні доктору Розальбі Алонсо-Родрігес, члену Виконавчого комітету Мережі дослідження морських прибережних стресорів у Латинській Америці та Карибському басейні (REMARCO), координатору компоненту шкідливого «цвітіння» водоростей (Мексика), та доктору Оскару Амайя, лабораторія морських токсинів (LABTOX-UES), Університет Ель-Сальвадору, координатору компоненту шкідливого «цвітіння» водоростей (REMARCO), Сальвадор. Крім того, дякуємо установам, які входять до складу Національної комісії з нагляду та контролю за токсичними червоними припливами Гватемали: DIPESCA (відбір двостулкових молюсків), INSIVUMEN (параметри навколишнього середовища), MSPAS (біологічний аналіз на мишах) і CONAPAS (відбір проб) за сприяння негайному підходу до стримування отруєння і спільній роботі з моніторингу та вивчення шкідливого «цвітіння» водоростей у Гватемалі. Marcia M. Gowing (Сіетл, Вашингтон, США) люб'язно покращила англійський стиль. Ми також вдячні анонімним рецензентам за вдосконалення рукопису.

Список літератури

- Alonso-Rodríguez R. 2004. *Hidrología y condiciones ambientales que determinan la proliferación de dinoflagelados causantes de mareas rojas en la bahía de Mazatlán, Sin., México*: Dr. Sci. Thesis. La Paz, B.C.S., México: Centro Invest. Biol. Nor., S.C. 116 p.
- Anderson D.M., Morel F.M. 1979. The seeding of two red tide blooms by the germination of benthic *Gonyaulax tamarens* hypnocyts. *Estuar. Coast. Mar. Sci.* 8(3): 279–293.
- AOAC. 2000. In: *Official methods of analysis of Association of Official Analytical Chemists*. Gaithersburg: AOAC. Pp. 59–61.
- Azanza R.V., Baula I.U. 2005. Fish kills associated with *Cochlodinium* blooms in Palawan, the “last frontier” of the Philippines. *Harm. Algae News*. 29: 13–14.
- Azanza R.V., Max Taylor F.J.R. 2001. Are *Pyrodinium* blooms in the Southeast Asian region recurring and spreading? A view at the end of the millennium. *AMBIO. J. Human Environ.* 30(6): 356–364.
- Band-Schmidt C., Duran-Riveroll L., Bustillos J., Leyva-Valenci, I., López-Cortés D., Nuñez-Vazquez E., Hernández F., Ramírez-Rodríguez D. 2019. Paralytic toxin producing dinoflagellates in Latin America: Ecology and physiology. *Front. Mar. Sci.* 6: 42.
- Bardales-Espinoza W.A., Castañón C., Herrera-Herrera J.L. 2019. In: *Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala*. Ciudad de Guatemala. Guatemala: Edit. Univ. UVG. Pp. 20–39.

- Brosnahan M.L., Ralston D.K., Fischer A.D., Solow A.R., Anderson D.M. 2017. Bloom termination of the toxic dinoflagellate *Alexandrium catenella*: Vertical migration behavior, sediment infiltration, and benthic cyst yield. *Limnol. Oceanogr.* 62: 2829–2849.
- Brosnahan M.L., Fischer A.D., Lopez C.B., Moore S.K., Anderson D.M. 2020. Cyst-forming dinoflagellates in a warming climate. *Harm. Algae*. 91: 101728.
- Comisión del Codex Alimentarius. 2017. Criterios para la aprobación de métodos biológicos utilizados para la detección de productos químicos de interés. In: *Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias (Budapest, 8–12 Mayo, 2017)*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Organización Mundial de la Salud. 12 p.
- Durán-Riveroll L.M., Band-Schmidt C.J., Okolodkov Yu.B., Almazán-Becerril A. 2019. In: *Costas y mares mexicanos: Contaminación, impactos, vulnerabilidad y cambio climático*. Ciudad de México. México: UNAM, UAC. Pp. 277–312.
- Fischer W., Krupp F., Schneider W., Sommer C., Carpent K.E., Niem V.H. 1995. *Guía FAO para la identificación de especies para los fines de pesca. Pacífico centro-oriental*. Vol. 1. *Plantas e invertebrados*. Roma, Italia: FAO. 664. p.
- Gao X. 2009. *TMDL Report: Nutrient and dissolved oxygen TMDLs for the Indian River Lagoon and Banana River Lagoon*. Tallahassee (Florida): Florida Depart. Environ. Protec. Division Environ. Asses. Rest.
- García-Moreiras I., Oliveira A., Santos A., Oliveira P., Amorim A. 2021. Environmental factors affecting spatial dinoflagellate cyst distribution in surface sediments off Aveiro-Figueira da Foz (Atlantic Iberian Margin). *Front. Mar. Sci.* 8: 699483.
- García-Pérez J., Carrillo-Ovalle L., Blanda E., Vargas-Montero M. 2018. First report of the genus *Gambierdiscus* from the Atlantic coast of Guatemala. *Harm. Algae News*. 61: 9–10.
- Glibert P.M., Burkholder J.M. 2018. Causes of harmful algal blooms. In: *Harmful algal blooms: A compendium desk reference*. 1st ed. Chichester, West Sussex (UK): John Wiley & Sons Ltd. Pp. 1–38.
- Hallegraeff G.M., Anderson D.M., Cembella A.D. 2003. *Manual on harmful marine microalgae*. Monographs on Oceanographic Methodology. 11. Paris: UNESCO. 793 p.
- Hoppenrath M., Chomérat N., Horiguchi T. 2014. *Marine benthic dinoflagellates –unveiling their worldwide biodiversity*. Stuttgart: Schweiz. Verlag. (Nagele u. Obermiller). 276 p.
- ICC Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. 2022. Resumen Meteorológico 2021. Resultados del Sistema Meteorológico del ICC. Guatemala. 57 p.
- INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología). 2022. Sección de hidrología. <https://insivumeh.gob.gt/?p=45289>
- Leiva A.V. 2008. *Eventos de marea roja ocurridos en el océano Pacífico de Guatemala*: Tesis maestría. Fac. ingenier., Univ. de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

- Moestrup Ø. 2009. *Taxonomic reference list of harmful microalgae*. Paris: IOC-UNESCO. www.marinespecies.org/hab
- Moore S.K., Trainer V.L., Mantua N.J., Parker M.S., Laws E.A., Backer L.C., Fleming, L.E. 2008. Impacts of climate variability and future climate change on harmful algal blooms and human health. *Environ. Health*. 7(2): S4.
- Phlips E.J., Badylak S., Nelson N.G., Havens K.E. 2020. Hurricanes, El Niño and harmful algal blooms in two sub-tropical Florida estuaries: Direct and indirect impacts. *Sci. Rep.* 10(1): 1910.
- Phlips E.J., Badylak S., Christman M., Wolny J., Brame J., Garland J., Hall L., Hart J., Landsberg J., Lasi M., Locjwood J., Paperno R., Scheidt D., Staples A., Steidinger K. 2011. Scales of temporal and spatial variability in the distribution of harmful algae species in the Indian River Lagoon, Florida, USA. *Harm. Algae*. 10(3): 277–290.
- Reguera B., Alonso R., Moreira A., Méndez S. 2011. *Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas. Manuales y Guías*. 59. Paris, Viena: Comis. Oceanográf. Int., Org. Nac. Unid. Educ., Ciencia Cult. 46 p.

Paz-Cordón K.E.¹ (<https://orcid.org/0009-0009-6673-6751>)

Okolodkov Y.B.² (<https://orcid.org/0000-0003-3421-3429>)

Cobo-Gradín F.³ (<https://orcid.org/0000-0001-5684-266X>)

¹ Instituto de Investigaciones Hidrobiológicas, Centro de Estudios del Mar y Acuicultura, Universidad de San Carlos de Guatemala (IIH-CEMA-USAC), Ciudad de Guatemala, Guatemala

² Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Universidad Veracruzana (ICIMAP-UV), Boca del Río, Veracruz, Mexico

³ Universidad de Santiago de Compostela (USC), Pontevedra, Galicia, Spain

Harmful blooms caused by dinoflagellates in the Pacific of Guatemala (2019– 2022)

Plankton studies in Guatemala are associated with the history of harmful algal blooms (HAB). An important event was observed in 1987, with 193 human poisonings due to shellfish consumption, of which 22 were lethal. The causative organism was *Pyrodinium bahamense* var. compressum. This species was reported again in November 2019 in the coastal Guatemalan Pacific. The species reached an abundance of 1×10^4 cells/L. In September 2020, the abundance of the *Margalefidinium polykrikoides* vegetative stage reached 1.24×10^6 cells/L, and its cysts 1.53×10^6 cells/L. *Noctiluca scintillans* proliferated (the first quantitatively estimated bloom of this species in Guatemala) in November 2020 and March 2021 (up to 1.2×10^6 cells/L). From January

to December 2021, monthly monitoring was carried out in front of the Port of Quetzal at three sites (bottle and 25 µm mesh net samples). In April 2022, 11 cases of humans presenting symptoms of paralytic shellfish poisoning (PSP) were recorded in the western sector of the Guatemalan Pacific, in particular, in the municipality of Tiquisate in the department of Escuintla. From May 3 to 27, 2022, a HAB event caused the death of 4 and the poisoning of 34 humans in the departments near Mexico: Retalhuleu (Champerico), San Marcos (Tilapa) and Escuintla (Tiquisate, Buena Vista and Iztapa). The maximum saxitoxin (STX) concentration was determined in Retalhuleu (14,099 MU/100 g); until 7 July 2022, STX continued to be detected in Tilapa and Tiquisate (1,021 MU/100 g). The *P. bahamense* cells were observed in the stomach contents of the clam *Tagelus* sp. (Bivalvia: Solecurtidae).

Key words: algal blooms, dinoflagellates, Guatemala, Guatemalan Pacific, microalgae, phytoplankton, paralytic shellfish poisoning, phytoplankton, *Pyrodinium bahamense*, saxitoxin

Citation. Paz-Cordón K.E., Okolodkov Y.B., Cobo-Gradín F. 2024. Harmful blooms caused by dinoflagellates in the Pacific of Guatemala (2019–2022). *Algologia*. 34(1): 3–19.
<https://doi.org/10.15407/alg34.01.003>