

ФАЗИ РОЗВИТКУ ОБШИРНОГО АПВЕЛІНГУ НА ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОМУ ШЕЛЬФІ ЧОРНОГО МОРЯ У СЕРПНІ 2019 РОКУ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ФІТОПЛАНКТОН

¹ Диханов Ю.М. – нач. відділу, duhanows@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1599-4461

^{1,2} Теренько Г.В. – к.б.н., с.н.с., ORCID: 0000-0002-5109-337X

^{1,3} Пономаренко В.В. – н.с., аспірант, ORCID: 0009-0000-6910-7197

^{1,3} Тітяпкин А.С. – нач. відділу, аспірант, ORCID: 0000-0002-7463-5442

¹ Мельник Є.А. – зав. сектору, ORCID: 0009-0001-9585-0993

¹ НДУ «Український науковий центр екології моря»

² Французький науково-дослідний інститут експлуатації моря, Іфремер,
F-29900, Конкарно, Франція

³ ДУ «Інститут морської біології НАН України»

У статті представлено результати дослідження фаз розвитку масштабного апвелінгу на північно-західному шельфі Чорного моря у серпні 2019 р. та його впливу на гідрологічні, гідрохімічні й біологічні характеристики морського середовища. Робота базується на аналізі супутникових даних, інструментальних спостережень на ГМС «Одеса-порт», вимірювань у районі мису Малий Фонтан і лабораторного аналізу фітопланктону. Особливу увагу приділено ролі вітрового режиму у формуванні апвелінгу.

Встановлено, що розвиток апвелінгу проходив у кілька фаз: формування, активного розвитку та згасання. Початковий етап був зумовлений посиленням північних і північно-західних вітрів до 9–12 м/с, що спричинило згін поверхневих і підйом холодних придонних вод біля східного та північного узбережжя. Подальша зміна напрямку вітру на південно-південно-західний активувала підйом глибинних вод біля західного й північно-західного узбережжя. Унаслідок цього температура поверхневих вод, в окремих локаціях, знизилася більш ніж на 9°C, а зона холодних вод охопила значну частину прибережної акваторії.

Гідрохімічний аналіз показав істотне зростання концентрацій біогенних речовин у період активної фази апвелінгу: вміст кремнію збільшився більш ніж у десять разів, нітритів – утричі, що сприяло активізації процесів продукування первинної речовини. Зафіксовано значний вплив апвелінгу на структуру фітопланктонного угруповання: кількість видів зросла з 13 до 28 у період максимальної активності, після чого зменшилася до 10. Одночасно відбулося суттєве зростання чисельності та біомаси фітопланктону.

Отримані результати підтверджують, що апвелінг є важливим природним механізмом, який викликає короточасні, але суттєві зміни екологічних параметрів морського середовища, збагачуючи поверхневі води поживними речовинами. Практичне значення роботи полягає у можливості використання результатів для прогнозування екологічного стану прибережних акваторій Чорного моря та оцінки впливу апвелінгу на інтенсифікацію процесів продукування первинної речовини.

Ключові слова: апвелінг, фітопланктон, північно-західний шельф, Чорне море.

Вступ

Вивченню прибережних апвелінгів Північно-західної частини Чорного моря присвячено велику кількість наукових праць. Так В. Івановим і О. Михайловою (2008) наведено класифікацію апвелінгу, розглянуто механізми його утворення та проведено чисельне моделювання для району північно-західного шельфу Чорного моря (ПЗШЧМ),

показано структуру і динаміку прибережного апвелінгу біля Південного берега Криму. Р. Боровською та іншими науковцями (2005) описаний вплив апвелінгу на результати промислу шпроту в районі острова Зміїний та біля Кримського узбережжя, а також вказаний досить тісний кореляційний зв'язок між параметрами атмосферного перенесення та інтенсивністю апвелінгу.

М. Михайловим (2024) досліджено два нових індекси апвелінгу для Чорного моря, отриманих на основі моделей кліматичного реаналізу та даних *in-situ*: індекс прибережного переносу в ході апвелінгу CUTI (the Coastal Upwelling Transport Index), який оцінює швидкість вертикального об'ємного переносу, та індекс біологічно ефективного переносу під час апвелінгу BEUTI (the Biologically Effective Upwelling Transport Index), який оцінює потік нітратів у поверхневий змішаний шар. При порівнянні результатів за 18 років спостережень розраховані індекси (модель) та інструментальні спостереження показали значну кореляцію. Це дозволяє використовувати індекси апвелінгу для прогностичних цілей.

Відомо що прибережні апвелінги неоднозначно впливають на екологічний стан морського середовища прилеглих акваторій. Підйом глибинних вод супроводжується винесенням біогенних речовин, що, насамперед, сприяє розвитку фітопланктонного комплексу організмів, зростанню біо- та рибопродуктивності.

З іншого боку, апвелінги можуть ініціювати розвиток гіпоксійно-аноксійних явищ у прибережних акваторіях, «цвітіння» води, заморів та загибелі гідробіонтів (Тучковенко и др. 2003).

Історично найсильніші апвелінги в районі одеського узбережжя спостерігалися на початку 80-х років минулого століття. Так, з 12.06 по 24.06 1981 р. за інтенсивного згону було зафіксовано падіння температури поверхневого шару (ТПШ) води на 16,5°C – з 26,4°C до 9,9°C (Андрианова и др. 2008). Відомі випадки швидкого зниження температури води. Так, проводячи високочастотні вимірювання температури води в прибережному придонному шарі протягом вісімнадцяти місяців, В. Большаков (2011) зафіксував 19 випадків зниження температури води більш ніж на 3°C протягом 30 хвилин. Вихід на поверхню, в прибережних районах, більш щільних вод, з їх подальшою адвекцією, викликає в приповерхневому шарі значну горизонтальну неоднорідність і генерує інтенсивні вздовжберегові течії. За певних метеоумов апвелінги охоплюють всю прибережну акваторію ПЗШЧМ, кардинально впливаючи на біоспільноту і, навіть, іноді змінюючи, в літній період, в межах шельфу, прибережну циркуляцію вод на зворотну, антициклональну (Попов и Матвеев 2019).

Таким чином, апвелінги можуть на якийсь час кардинально змінити екологічний стан прибережних вод ПЗШЧМ і кожен випадок просторово-масштабного апвелінгу потребує особливої уваги.

На жаль, за останні роки публікацій вітчизняних фахівців на тему «Апвелінги в Чорному морі» практично відсутні.

Мета роботи полягає в дослідженні причин виникнення, фаз розвитку великомасштабного апве-

лінгу в ПЗШЧМ у серпні 2019 року, а також показати зміни, що відбулися у гідрологічних, гідрохімічних та біологічних характеристиках морського середовища під впливом цього природного явища.

Матеріали та методи досліджень

У роботі використовувалася супутникові дані, результати інструментальних спостережень та мікробіологічних досліджень фітопланктонного угруповання. Були використані результати комплексних спостережень у районі мису Малий Фонтан (ММФ: 46.438 пн. ш., 30.772 сх. д.) у серпні 2019 року. Відбір проб проводився згідно наведеної карти-схеми точок відбору проб (рис. 1). Вимірювання проводилися з кінця молу на відстані близько 50-ти м від берегової лінії, на поверхневому та придонному горизонтах (глибина 3 м). Вимірювання температури води виконувалися щодня о 12 годині за Київським літнім часом (UTC+3) із 01 по 15 серпня 2019 р. Проби для гідрохімічних аналізів відбиралися щотижня з 17 липня по 15 серпня. Також залучалися результати спостережень на ГМС «Одеса-порт» (далі ГМС) та морські спостереження програми EMBLAS-Plus (2019).

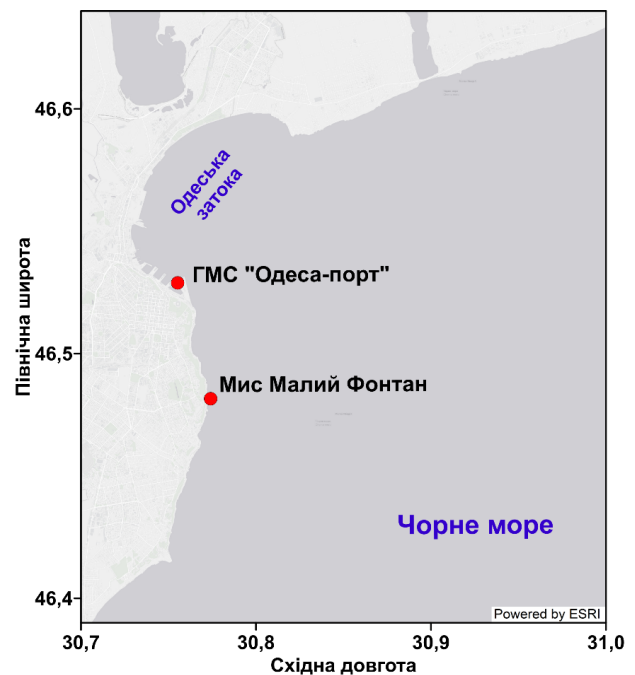


Рис. 1. Карта-схема точок відбору проб та вимірювань

В роботі використані метеодані (карта приземного тиску німецького метеорологічного архіву даних (Wetter3 2026), поля вітру (Ventusky 2026), температури поверхні води програми Європейського Союзу щодо спостереження за Землею Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS 2026).

Зразки фітопланктону відбирали з поверхневого шару (0,5–1 м) у пластикові пляшки об'ємом

1,5–2 л протягом трьох тижнів (24.07–14.08.2019) на станції контролю ММФ. У лабораторії зразки концентрували методом зворотної фільтрації (Федоров 1979; Сорокин 1979). Кінцевий об'єм доводили до 15–20 мл та консервували нейтралізованим 40% розчином формальдегіду до кінцевої концентрації 4%.

Підрахунок клітин здійснювали у камері Нажотта 0,05 мл під світловим мікроскопом Mikmed-2, при збільшенні в 300–600 разів.

Розрахунки чисельності та біомаси клітин зроблені за допомогою програмного забезпечення DCT (data collection template) – шаблони збору даних, розроблених за допомогою Microsoft Excel, з використанням сценарію Visual Basic в Українському науковому центрі екології моря (м. Одеса).

У нашому випадку, під поняттям повний апвелінг мається на увазі ситуація, коли холодні води шару стрибка температури виходять на поверхню, заміщуючи води верхнього квазіоднорідного шару.

Результати та обговорення

Аналіз супутникової інформації

Один з найпотужніших апвелінгів, який охопив усю прибережну частину ПЗШЧМ, розпочався на початку серпня 2019 року. Так, 01–02 серпня над акваторією ПЗШЧМ домінували вітри східних напрямків. У полі температури поверхневого шару

(ТПШ) у прибережній смузі виділялися локації від'ємних аномалій із помітними вихороподібними шлейфами (філаментами), які викликані вздовж береговими варіаціями рельєфу дна, особливостями берегової лінії і турбулентними динамічними утвореннями, характерними для фронтальних зон (рис. 2) (Іванов и Михайлова 2008).

На початку серпня Одеський регіон знаходився у зоні низького тиску. Протягом кількох днів відбувалося її посилення, що врешті-решт 03 серпня 2019 року призвело до виникнення замкненого циклонального центру над територією Румунії. У ніч проти 04 серпня 2019 року відбувалось активне формування стаціонарного фронту (рис. 3). Зміщення центру циклону у напрямку Кримського півострова призвело до зміни напрямку вітру зі східного на північно-західний.

За даними строкових спостережень ГМС у районі Одеського узбережжя з опівночі 04 серпня різко посилювався вітер північних румбів до 9–12 м/с (пориви до 17 м/с), надалі з 18:00 за Київським часом, швидкість вітру впала до 2–3 м/с. Посилення згінного вітру викликало падіння рівня моря в районі ГМС на 15 см.

У полі ТПШ 04 серпня помітно розширилися ділянки холодних аномалій, які виглядали вже як

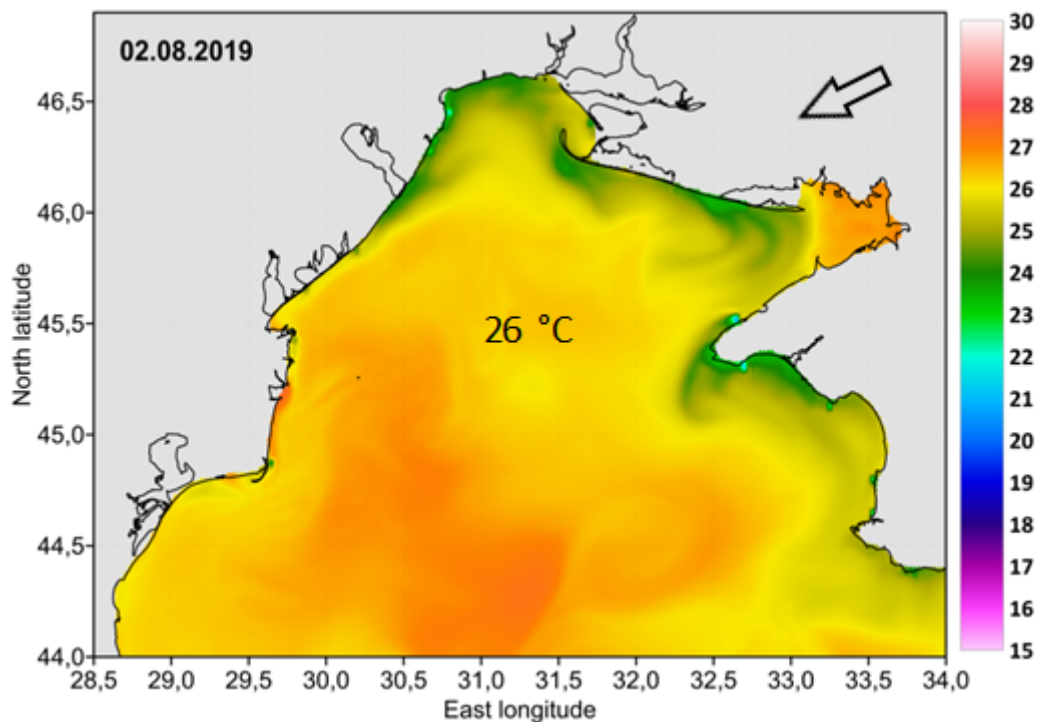


Рис. 2. Розподіл середньодобової температури поверхні води ПЗШЧМ 02 серпня 2019 року за даними СМЕМС (2026)

Примітка: Стрілка показує генеральний напрямок вітру над акваторією (Ventusky 2026); так само й на наступних рисунках

сдина безперервна вздовж берегова смуга від північного краю Каламітської затоки на сході до греблі озера Сасик на заході (рис. 4а).

Протягом 06 серпня за слабкого північно-західного вітру в районі проведення інструментальних спостережень поблизу мису Малий Фонтан, на поверхні води була виявлена зона помітно зниженої температури (рис. 4б; локація помічена червоним квадратом). Зазначимо, що подія сталася на другу добу після падіння рівня води в районі ГМС. Такі ж ділянки на поверхні води можна відзначити поблизу

мису Тарханкут з підвітряного боку та біля південного берега Криму. Безумовно, ця вода належить шару стрибка температури, який у цей період в центральній частині ПЗШЧМ розташовувався на глибинах від 10 до 15 м, де температура води зменшувалась з 22°C до 12°C відповідно (EMBLAS 2019).

Так само видно, що апвелінгові води, що утворилися біля південно-східного узбережжя Криму, потрапили в зону дії Севастопольського антициклонального вихору і опинилися практично у центрі ПЗШЧМ. Таким чином посилювалися процеси обміну

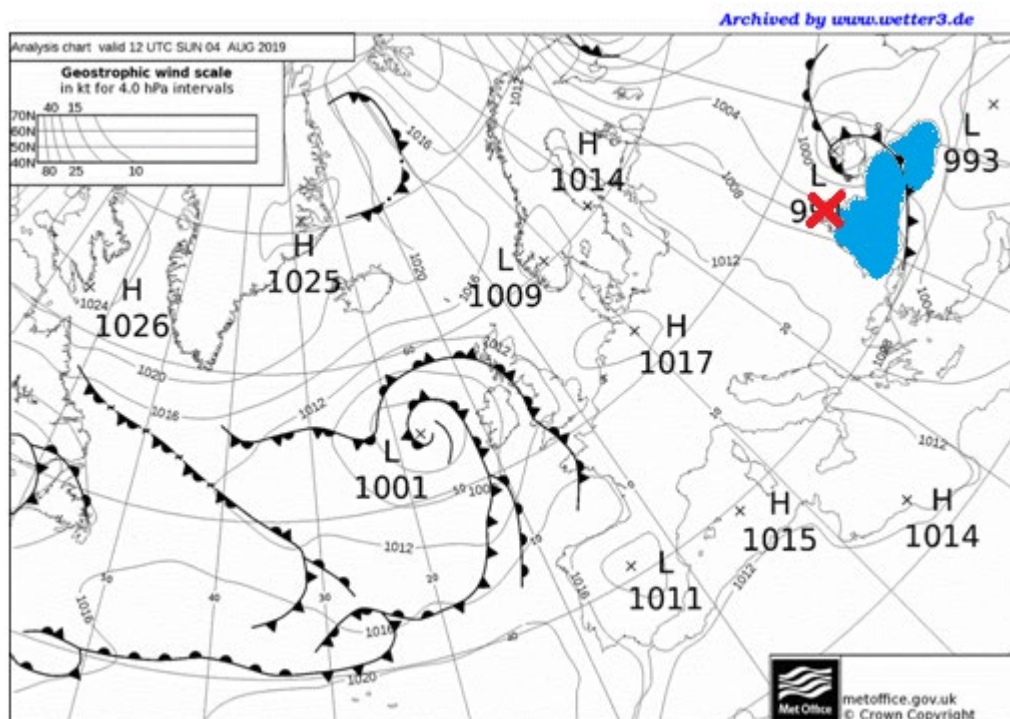


Рис. 3. Карта приземного тиску за 12 UTC 04.08.2019 року (Wetter3 2026)

Примітка: Район проведення спостережень позначено червоним перехрестям

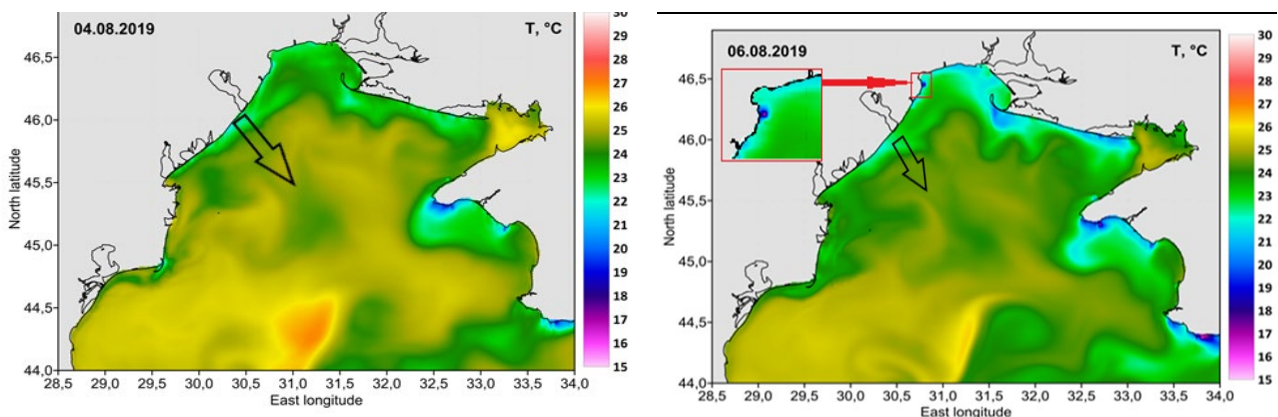


Рис. 4. Розподіл середньодобової температури поверхні води ПЗШЧМ 04 серпня («а») та 06 серпня («б») 2019 р. за даними СМЕМС (2026)

Примітка: На вставці збільшений фрагмент рисунку виділено червоним квадратом

між поверхневими та підповерхневими прибережними водами з водами відкритої частини моря. Зважаючи на відоме транспортування, при апвелінгу, біогенних елементів із глибинних шарів до поверхні, цілком можна припустити, що їхня адвекція в центральну частину моря може створити умови для розвитку фітопланктону та послабити ризики евтрофікації у прибережній акваторії.

Протягом 07–08 серпня напрямок вітру змінився на південно-західний і його швидкість зросла до 9–10 м/с, що, у свою чергу, активувало процеси апвелінгу на узмор'ї Дунаю. Вихід холодних вод на поверхню спостерігався вздовж усього узбережжя, а це близько 780 км: від мису Сарич на сході, до Сулінського гирла на заході. Апвелінг досяг максимальної фази розвитку. Найбільш потужні прояви апвелінгу відмічені на ділянці від Одеської затоки до району Кароліно-Бугаза (рис. 5а).

На рисунку 5б представлений просторовий розподіл ізотерм ТПШ у західній частині ПЗШЧМ.

У прибережній акваторії виділяються ядра апвелінгу – ділянки, де вихід на поверхню термокліну відбувався більш інтенсивно.

Неоднорідність температурного поля в прибережній смузі виникла внаслідок впливу морфологічних особливостей берегової смуги та рельєфу дна на динаміку вод у зоні апвелінгу. Найбільш сильний вихід холодних вод виявлено у районі мису Великий Фонтан.

Далі у напрямку відкритого моря розташовувалася фронтальна зона, що виникла в результаті тримірної адвекції холодних вод. Зовнішня межа фронтальної зони має хвилеподібний вигляд і певною мірою повторює форму берегової смуги.

На рисунку 6 показаний графік розподілу ТПШ на широтному перерізі, спрямованому за квазіномаллю від узбережжя мису Малий Фонтан уздовж 46.37° пн. ш.

З аналізу графіка випливає, що холодні глибинні води, що вийшли на поверхню, поширилися

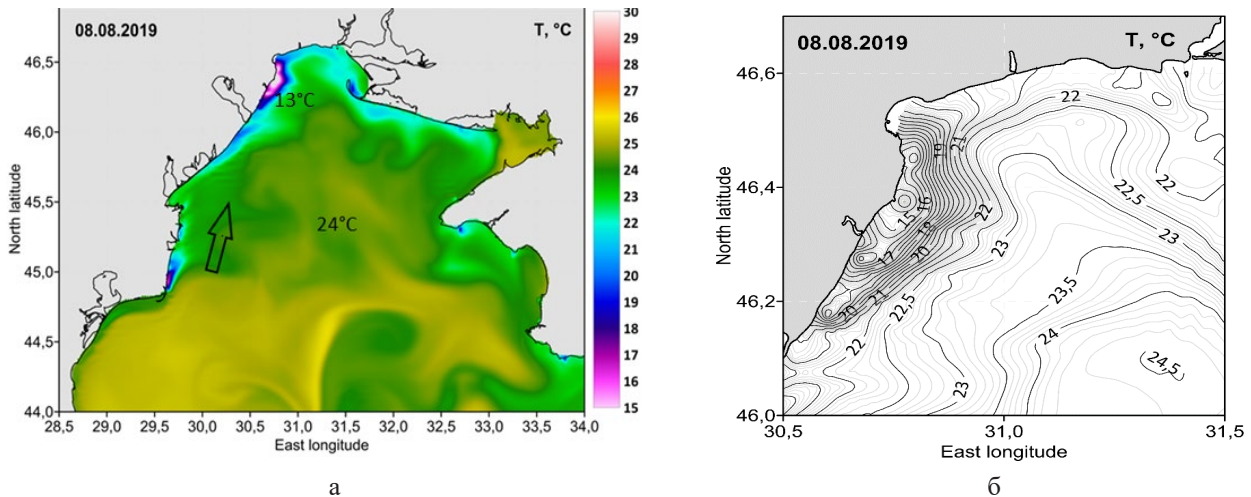


Рис. 5. Розподіл середньодобової температури поверхні води ПЗШЧМ («а» кольорова) та просторовий розподіл ізотерм («б») 08 серпня 2019 р. за даними СМЕМС (2026)

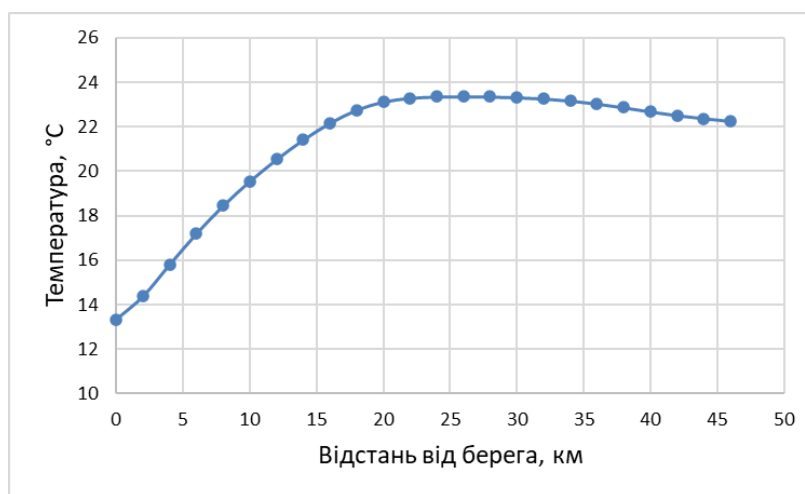


Рис. 6. Розподіл температури поверхні води на перерізі уздовж 46.37° пн. ш. 08 серпня 2019 р. за даними СМЕМС (2026)

від берега на відстань близько 18 км. Значення температури води біля берега становило 13,3°C. Максимальний градієнт температури води у східному напрямку становив 0,7°C/км, за три кілометри від берега. У цей період розвиток апвелінгу відбувався ближче до екманівського типу, коли берег знаходиться ліворуч від напрямку вітру (Ekman 1905; Jасох et al. 2018).

Загалом ТПШ моря в центральній частині акваторії ПЗШЧМ знизилася на величину близько 2 градусів (порівняно із 02.08.2026, рис. 2). Це ймовірно вплинуло на теплообмін між атмосферою та морем в масштабах нашого регіону.

Протягом 10 серпня вітер дещо послабився, але загальна вітрова ситуація не змінилася. Наступної доби напрямок загального вітрового потоку знову змінився на північно-західний, швидкість якого становила 3–4 м/с. За візуальною оцінкою загальна площа поверхневих холодних вод зменшилася. Повний апвелінг спостерігався лише у районі Сухого лиману (рис. 7а). Відновилися ТПШ і у Каркінітській затоці.

З 11 по 13 серпня над акваторією ПЗШЧМ спостерігався слабкий вітер змінних напрямків. Активна фаза дії апвелінгу закінчилася. Протягом 14 серпня домінував східний вітер, який у свою чергу спричинив підйом глибинних вод у районі північного узбережжя мису Тарханкут. На той час ТПШ центральної частини підвищилася до типових значень 25–26°C (рис. 7б).

Інструментальні спостереження

Гідрологія та гідрохімія

На рисунку 8 представлені графіки часової мінливості температури води в точках спостережень у період з 01 по 15 серпня 2019 року із значеннями солоності води та рівня моря за даними ГМС.

У районі ГМС зниження ТПШ почалося за дві доби після падіння рівня, на ММФ – на добу раніше,

05 серпня. Різницю у часі можна пояснити варіаціями батиметрії та орієнтацією берегової полоси відносно напрямку вітру районів розташування точок спостереження. ГМС знаходиться у напівзакритій Одеській затоці, на мілководді. Глибина в точці вимірювань становить 6 м. Берегова лінія ММФ межує з відкритою акваторією моря. У цьому місці 20-ти метрова ізобата підходить до берега на відстань 300–350 м, що значно ближче, ніж на інших сусідніх ділянках. Отже, шар холодної води, який досяг поверхні, так само знаходився ближче до берега.

З урахуванням дискретності спостережень (один раз на добу) можна розрахувати деякі параметри апвелінгу. Період його розвитку, як різниця між початком зниження температури і мінімальним значенням, становив для ММФ три доби, для ГМС – дві доби. Інтенсивність апвелінгу, як різниця між початковою температурою і мінімальним значенням температури води, у поверхневому шарі складала для ММФ 9,6°C – з 22,6°C до 13,0°C, для ГМС 7,1°C – з 21°C до 13,9°C. Тривалість цього явища складала шість діб для ММФ та чотири доби для ГМС. Мінімальні значення ТПШ в обох точках спостерігалися 08 серпня.

Знаючи глибину залягання шару води з температурою 13°C, можна орієнтовно оцінити вертикальну швидкість його підйому, величина якої складала близько 0,007 см/с.

Відзначимо також природне підвищення солоності у момент виходу на поверхню більш солоних підповерхневих вод до 16,73 опс поблизу ГМС та з 17,75 опс до 18,41 опс біля ММФ. Проміжний мінімум солоності на ГМС, 05 серпня, 14,61 опс був викликаний рясними опадами (22 мм/доб).

Отримані нами результати добре узгоджуються з супутниковою інформацією, що підтверджує репрезентативність супутникових даних щодо ТПШ при

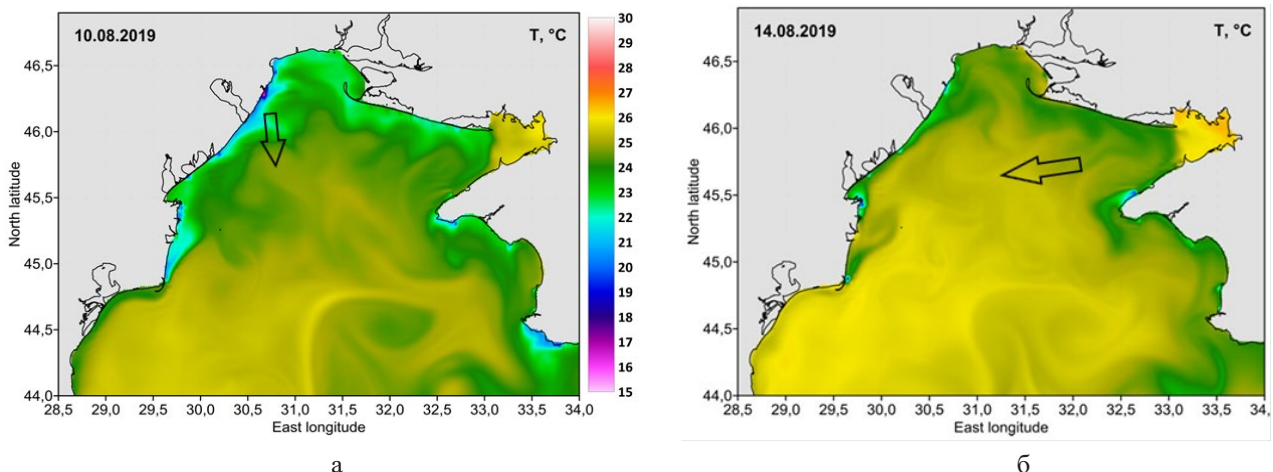


Рис. 7. Розподіл середньодобової температури поверхні води ПЗШЧМ 10 серпня («а») та 14 серпня («б») 2019 р. за даними СМЕМС (2026)

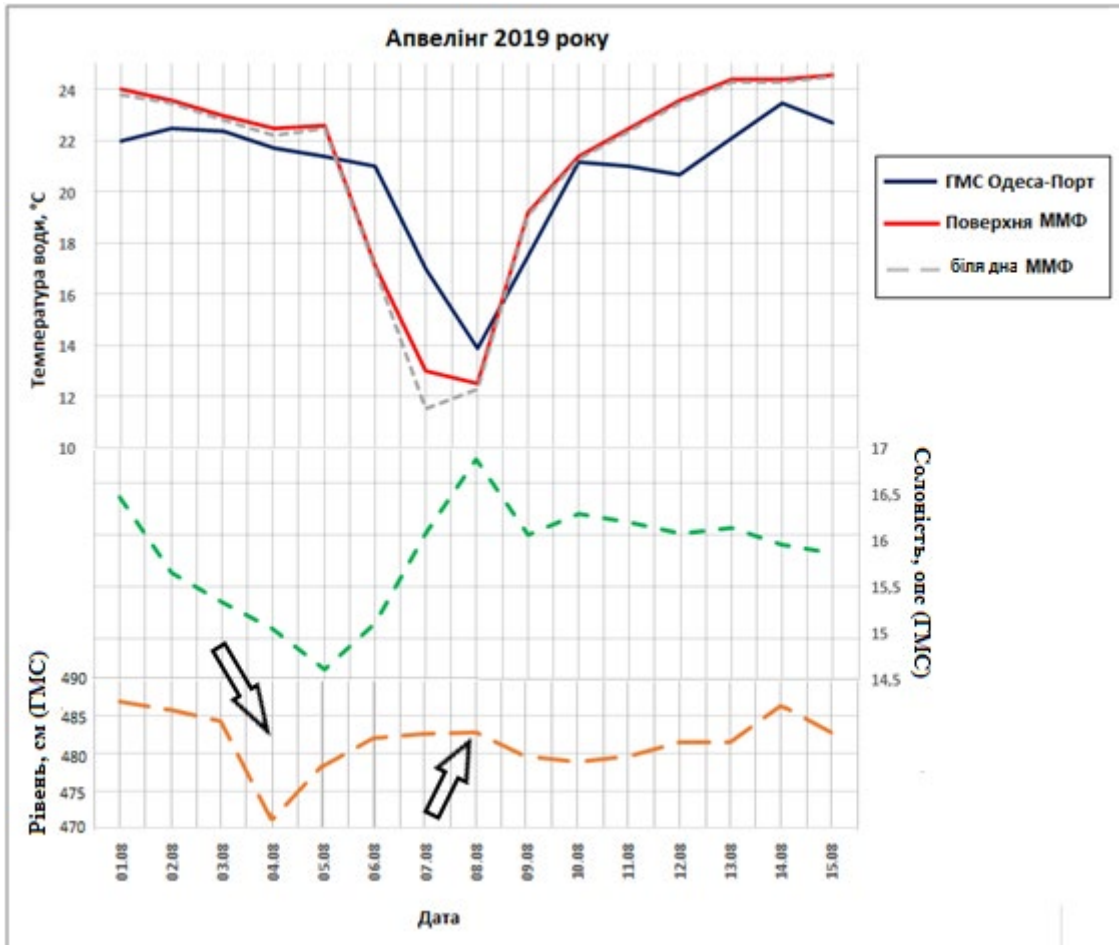


Рис. 8. Часова мінливість деяких гідрологічних параметрів морської води в районі мису Малий Фонтан та ГМС «Одеса-порт» у період з 01 до 15 серпня 2019 р.

Примітка: Стрілками вказані основні напрямки вітру

проведенні моніторингу прибережних апвелінгів. На наведених картах просторового розподілу ТПШ також видно прояв виходу холодних вод 06 серпня у районі ММФ (рис. 4б) і його прояв 08 серпня (рис. 5а). Незважаючи на те, що супутникові дані являли собою середньодобові значення ТПШ, а інструментальні спостереження – строкові (12:00), їх чисельні значення виявилися близькими в прибережному районі ММФ: за СМЕМС – 13,3°C, за інструментальними спостереженнями – 12,9°C. Зазначимо, що за результатами порівняння супутникових даних температури поверхні води за відповідними даними спостережень на українських прибережних гідрометеорологічних станціях і постах, відхилення не перевищують 0,5°C (Полежаєв, Тітякин та Диханов 2023).

Апвелінг суттєво вплинув на гідрохімічний стан прибережних вод. Восьмого серпня спостерігалось підвищення концентрацій біогенних речовин: кремнію – майже у десять разів з 29 мкг/л до 248 мкг/л

(на графіку значення кремнію зменшені удесятеро), загального фосфору майже на 50% – з 16 мкг/л до 22 мкг/л, нітритів – з 0,4 мкг/л до 1,48 мкг/л. Також зафіксовано підвищення концентрації розчиненого кисню з 8,25 мг/л до 11,26 мг/л (рис. 9).

Фітопланктон

Апвелінг значно змінив угруповання фітопланктону, замінивши місцеві аборигенні види, солонуватоводного та прісноводного генезису, на морські великоклітинні (рис. 10). У цей період помічене збільшення його різноманіття. Так напередодні апвелінгу зафіксовано 13 видів фітопланктону в пробі (24.07.2019), у період апвелінгу – 28 видів (08.08.2019), що було одним із максимальних значень за 2019 рік. Після закінчення апвелінгу (14.08.2019) спостерегалось 10 видів

Також спостерігали різке збільшення кількісних показників фітопланктону – чисельності (N) та біомаси (B) (рис. 11, табл. 1).

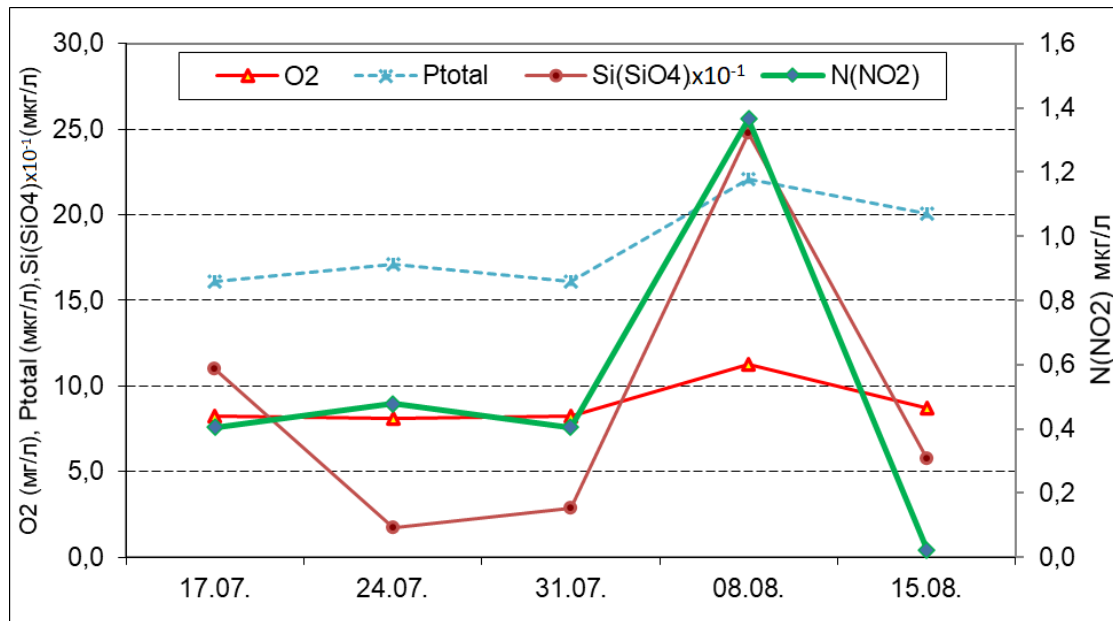


Рис. 9. Часова мінливість гідрохімічних параметрів морської води в районі мису Малий Фонтан у період апвелінгу у серпні 2019 р.

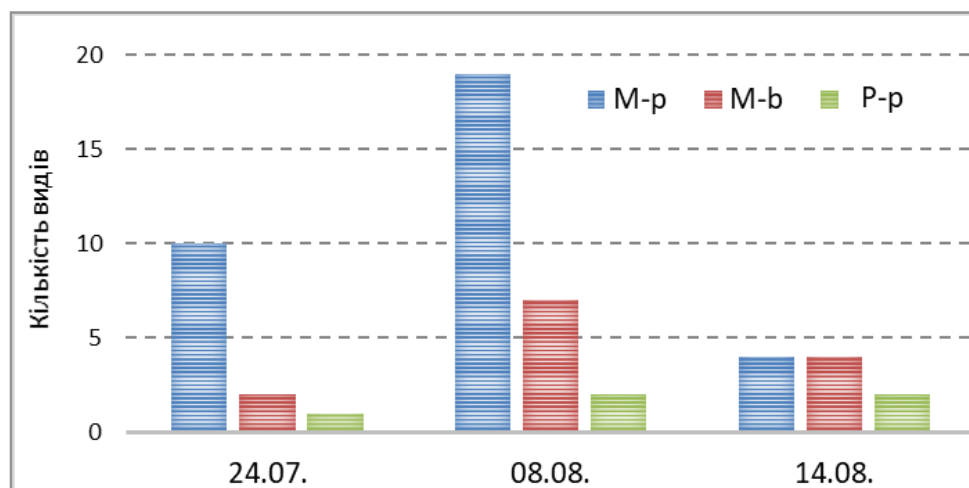


Рис. 10. Кількісна характеристика фітопланктону в районі мису Малий Фонтан у період апвелінгу у серпні 2019 р.

M-p – морські планктонні; *M-b* – морські бентичні; *P-p* – прісноводні планктонні

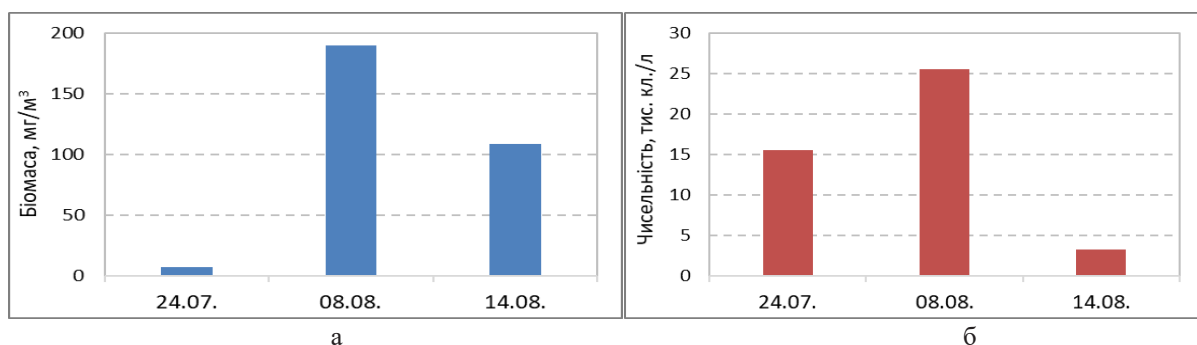


Рис. 11. Біомаса («а») та чисельність фітопланктону («б») в районі мису Малий Фонтан у період апвелінгу у серпні 2019 р.

Кількісні показники фітопланктону в період апвелінгу в районі ММФ у 2019 р.

24.07.2019		08.08.2019		14.08.2019	
N, x10 ³ кл/л	B, мг/м ³	N, x10 ³ кл/л	B, мг/м ³	N, x10 ³ кл/л	B, мг/м ³
15,50	7,30	25,50	189,50	3,30	108,68

У більшості випадків це були динофлагелати, представники морського комплексу, види родів *Protoperidinium*, *Prorocentrum*, *Triplos*, *Ceratium*, *Blixaea* Gottschling, *Dinophysis* Ehrenberg, *Scrippsiella* Balech, *Gyrodinium* Kofoid & Swezy, *Gymnodinium* Stein, *Asadinium* Elbrächter & Tillman, *Gonyaulax* Diesing та *Lingulaulax* Head et al. Значну частину планктону також становили бентосні види діатомових родів *Coscinodiscus* Ehrenberg, *Amphora* Ehrenberg & Kützing, *Cymbella* C.Agardh, *Cocconeis* Ehrenberg, *Licmophora* C.Agardh, *Achnanthes* Bory, *Navicula* Bory, *Plagiotropis* Pfitzer та ін., які підіймалися із придонних горизонтів. Також, у фітопланктонному комплексі була відзначена група фототрофних флагеллят роду *Teleaulax* D.R.A.Hill (Cryptophyceae) і *Tetraselmis* F.Stein (Chlorophyta), які є основною здобиччю для гетеротрофних і мікротрофних динофлагелат.

Висновки

У першій половині серпня 2019 року на північно-західному шельфі Чорного моря зафіксовано масштабний апвелінг змішаного типу: прямий – спричинений згінним вітром північно-західного напрямку зі швидкістю 9–12 м/с, який викликав підйом холодних вод біля східного та північного узбережжя, об'єднався, з апвелінгом екманівського типу, який у свою чергу, під дією південно-західного вітру активував підйом холодних вод вздовж західного узбережжя. Швидка зміна напрямку сильного вітру, з північних румбів на південні, призвела до виходу холодних глибинних вод вздовж усього узбережжя північно-західного шельфу Чорного моря та зниження температури верхнього шару води у центральній частині акваторії на величину близько двох градусів Цельсія.

Встановлено період часу між початком вітрового впливу та виходом глибинних вод на поверхню: зниження рівня моря у районі ГМС «Одеса-порт» на 15 см передувало підйому холодних вод на дві доби. Інтенсивність апвелінгу склала 9,6°C у районі мису Малий Фонтан (зниження з 22,6°C до 13°C) та 7,1°C у районі ГМС «Одеса-порт» (з 21,0°C до

13,9°C). Вертикальна швидкість підйому глибинних вод становила близько 0,007 см/с.

Апвелінг суттєво вплинув на гідрохімічний стан прибережних вод: у пік активної фази (08 серпня) зафіксовано різке зростання концентрацій біогенних речовин – кремнію майже у 10 разів (з 29 до 248 мкг/л), загального фосфору на майже 50% (з 16 до 22 мкг/л), нітритів – з 0,4 до 1,48 мкг/л. Паралельно зросла концентрація розчиненого кисню з 8,25 до 11,26 мг/л.

У період апвелінгу спостерігались різкі зміни фітопланктонних комплексів, коли солонуватоводний та прісноводний комплекс змінився на морський великоклітинний, з домінуванням гетеротрофних та мікротрофних динофлагелат. Напередодні апвелінгу зафіксовано 13 видів фітопланктону, у період апвелінгу – 28 видів (08.08.2019), що було одним із максимальних значень за 2019 рік. Також спостерігали різке збільшення кількісних показників фітопланктону – чисельності та біомаси.

Отримані результати натурних спостережень узгоджуються з даними супутникового моніторингу (відхилення температури поверхні води не перевищують 0,5°C), що підтверджує можливість використання супутникових продуктів СМЕМС, як надійного інструменту, для дослідження процесів апвелінгу в регіоні.

У першій половині серпня акваторія північно-західного шельфу Чорного моря була під дією процесів апвелінгу протягом шести діб.

Отримані результати підтверджують, що апвелінг є важливим природним механізмом, який викликає короточасні, але суттєві зміни екологічних параметрів морського середовища.

Робота виконана в рамках тематичного плану прикладних наукових досліджень за бюджетною програмою КПКВК 2401040 «Прикладні наукові та науково-технічні розробки, виконання робіт за державними цільовими програмами і державним замовленням у сфері природоохоронної діяльності, фінансова підтримка підготовки наукових кадрів» на 2019 р., затвердженого Міністром екології та природних ресурсів України від 18.07.2019 р.

Список використаних джерел

1. Андрианова О.Р., Белевич Р.Р., Шамраев Ю.И., Буров А.М. Статистическая оценка апвеллинга у побережья Одессы. *Екологічні проблеми Чорного моря* : зб. матеріалів до 10-го міжнар. симпозіуму. Одеса, 2008. С. 350–359.
2. Большаков В.Н. Изменчивость температуры воды у побережья Одессы в масштабах от года до получаса. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2011. № 9. С. 220–227.

3. Боровская Р.В., Панов Б.Н., Спиридонова Е.О., Лексикова Л.А., Кириллова М.В. Прибрежный черноморский апвеллинг и межгодовая изменчивость его интенсивности. *Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу*. 2005. Вип. 12. С. 42–48.
4. Иванов В.А., Михайлова Е.Н. Апвеллинг в Черном море. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2008. 92 с.
5. Німецький метеорологічний архів даних. URL: https://www.wetter3.de/archiv_ukmet_en.html
6. Полежаев Є.К., Тітяпкин А.С., Диханов Ю.М. Просторово-часова змінність температури поверхневого шару води Чорного та Азовського морів. *Океанографічний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*. 2023. 5(16). С. 49–59.
7. Попов Ю.И., Матвеев А.В. Апвеллинги и циркуляция вод северо-западного шельфа Черного моря в летний период 2017 года. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 24. С. 104–114. DOI: 10.31481/uhmj.24.2019.10.
8. Сорокин Ю.И. К методике концентрирования фитопланктона. *Гидробиологический журнал*. 1979. Т. 15. № 2. С. 71–76.
9. Тучковенко Ю.С., Доценко С.А., Никонов В.А., Савин П.Т. Роль ветрового прибрежного апвеллинга в возникновении гипоксии в одесском регионе северо-

ро-западной части Черного моря. *Экология моря*. 2003. Вып. 63. С. 60–65.

10. Федоров В.Д. О методах изучения фитопланктона и его активности. Москва : Наука, 1979. 166 с.
11. Чеський застосунок прогнозу погоди. URL: <https://www.ventusky.com>
12. CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). (2026). Black Sea – BLKSEA_MULTYEAR_PHY_007_004 [Data set]. Marine Data Store (MDS). <https://doi.org/10.48670/mds-00356> (дата звернення: 09.03.2026)
13. Ekman W. On the influence of the earth's rotation on ocean currents. *Arkiv For Matematik Astronomi och Fysik*. 1905. 2. 1–52.
14. EMBLAS-Plus. *European Union for Improving Environmental Monitoring of the Black Sea: project reports*. 2019. <https://database.blackseadb.org/>
15. Jacox M.G., Edwards C.A., Hazen E.L., Bograd S.J. Coastal upwelling revisited: Ekman, Bakun, and improved upwelling indices for the US west coast. *JGR Oceans*. 2018. 123. 7332–7350. <https://doi.org/10.1029/2018JC014187>
16. Mihailov M.E. The Black Sea Upwelling System: Analysis on the Western Shallow Waters. *Atmosphere*. 2024. 15(8). 999. <https://doi.org/10.3390/atmos1508099>

References

1. Andryanova, O.R., Belevych, R.R., Shamraev, YU.Y., & Burov, A.M. (2008). Statystycheskaya otsenka apvellynha u poberezh'ya Odessy [Statistical assessment of upwelling off the coast of Odessa]. *Ekolohichni problemy Chornoho moria – Environmental problems of the Black Sea: zb. materialiv do 10-ho mizhnar. Sympoziumu [collection of materials for the 10th international symposium]*. Odesa [in Russian].
2. Bol'shakov, V.N. (2011). Izmenchivost' temperatury vody u poberezh'ya Odessy v masshtabakh ot goda do poluchasa [The variation of water temperature in Odessa coastal waters in the one year to half hour scale]. *Український гідрометеорологічний журнал – Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 9, 220–227 [in Russian].
3. Borovskaya, R.V., Panov, B.N., Spirydonova, E.O., Leksykova, L.A., & Kyryllova, M.V. (2005). Prybrezhnyy chernomorsky apvellynhy mezhhodovaya yzmenchivost' eho yntensyvnyosti [Coastal Black Sea upwelling and interannual variability of its intensity]. *Ekolohichna bezpeka prybrezhnoy i ta shel'fovoyi zon ta kompleksne vykorystannya resursiv shel'fu – Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, 12, 42–48 [in Russian].
4. Yvanov, V.A., & Mykhailova, E.N. (2008). *Apvellynh v Chernom more [Upwelling in the Black Sea]*. Sevastopol : MHY NAN Ukrainy [in Russian].
5. Nimetski meteorolohichni arkhiv danykh. URL: https://www.wetter3.de/archiv_ukmet_en.html
6. Polezhaiev, Ye.K., Titiapkyn, A.S., & Dykhanov, Yu.M. (2023). Prostorovo-chasova zminnist temperatury

poverkhnevoho sharu vody Chornoho ta Azovskoho moriv [Spatiotemporal variability of the surface water temperature of the Black and Azov Seas]. *Okeanohrafichnyi zhurnal (Problemy, metody ta zasoby doslidzhen Svitovoho okeanu) – Oceanographic Journal (Problems, Methods and Means of Research of the World Ocean)*, 5(16), 49–59 [in Russian].

7. Popov, Yu.Y., & Matveev, A.V. (2019). Apvellynhy y tsyrkulyatsiya vod severo-zapadnoho shelfa Chernoho moria v letnyi peryod 2017 hoda [Upwellings and water circulation of the north-western shelf of the Black Sea in the summer of 2017]. *Український гідрометеорологічний журнал – Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 24, 104–114 [in Russian].
8. Sorokyn, Yu.Y. (1979). K metodyke kontsentryrovanyia fytoplanktona. *Hydrobiologicheskyy zhurnal – Hydrobiological Journal*, 15(2), 71–76 [in Russian].
9. Tuchkovenko, Yu.S., Dotsenko, S.A., Nykonov, V.A., & Savyn, P.T. (2003). Rol vetrovoho prybrezhnoho apvellynha v voznykoveny hypoksyi v odesskom rehyone severo-zapadnoi chasty Chernoho moria [The role of wind-driven coastal upwelling in the occurrence of hypoxia in the Odessa region of the northwestern Black Sea]. *Ekologiya moria – Ecology of the sea*, 63, 60–65 [in Russian].
10. Fedorov, V.D. (1979). *O metodakh yzuchenyia fytoplanktona y eho aktyvnosti [On methods of studying phytoplankton and its activity]*. Moskva : Nauka [in Russian].

11. Cheskyi zastosunok prohnozu pohody. URL: <https://www.ventusky.com>
12. CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). (2026). Black Sea – BLKSEA_MULTIYEAR_PHY_007_004 [Data set]. Marine Data Store (MDS). <https://doi.org/10.48670/mds-00356>
13. Ekman, W. (1905). On the influence of the earth's rotation on ocean currents. *Arkiv For Matematik Astronomi och Fysik*, 2, 1–52.
14. EMBLAS-Plus. European Union for Improving Environmental Monitoring of the Black Sea: project reports. (2019). <https://database.blackseadb.org>.
15. Jacox, M.G., Edwards, C.A., Hazen, E.L., & Bograd, S.J. (2018). Coastal upwelling revisited: Ekman, Bakun, and improved upwelling indices for the US west coast. *JGR Oceans*, 123, 7332–7350.
16. Mykhaylov, M.E. (2024). The Black Sea Upwelling System: Analysis on the Western Shallow Waters. *Atmosphere*, 15(8), 999.

PHASES OF THE DEVELOPMENT OF THE EXTENSIVE UPWELLING ON THE NORTHWESTERN SHELF OF THE BLACK SEA IN AUGUST 2019 AND ITS IMPACT ON PHYTOPLANKTON

- ¹ *Dykhanov Yu.M.*, Head of Department,
² *Terenko G.V.*, Ph.D., leading researcher,
^{1,3} *Ponomarenko V.V.*, researcher, postgraduate,
^{1,3} *Tityapkin A.S.*, Head of Department, postgraduate,
¹ *Melnyk E.A.*, Head of Sector
¹ Ukrainian Scientific Centre of Ecology of the Sea
² French Research Institute for the Exploitation of the Sea
³ Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine

The article presents the results of a study on the development phases of a large-scale upwelling event on the northwestern shelf of the Black Sea in August 2019 and its impact on the hydrological, hydrochemical, and biological characteristics of the marine environment. The study is based on the analysis of satellite data, instrumental observations from the Odesa-Port Hydrometeorological Station, measurements conducted near Cape Malyi Fontan, and laboratory analysis of phytoplankton samples. Changes in sea surface temperature, salinity, sea level, and nutrient concentrations during the period of 1–15 August 2019 were investigated. Particular attention was paid to the role of wind conditions in the formation of the upwelling event.

It was established that the development of the upwelling occurred in several phases: preconditioning, active development, and decay. The initial stage was caused by the intensification of northern and northwestern winds up to 9–12 m/s, which led to the offshore transport of surface waters and the rise of cold bottom waters near the eastern and northern coasts. A subsequent shift in wind direction to south–southwestern activated the upwelling of deep waters near the western and northwestern coasts. As a result, the surface water temperature decreased in separate locations by more than 9 °C, and the cold-water zone covered a significant part of the coastal area.

Hydrochemical analysis revealed a substantial increase in nutrient concentrations during the active phase of the upwelling: silicon concentrations increased more than tenfold, nitrite concentrations tripled, and total phosphorus increased by 20%, contributing to the intensification of productive processes. A significant impact of upwelling on the phytoplankton structure was also recorded: the number of species increased from 11 to 28–35 and subsequently decreased to 10.

The obtained results confirm that upwelling is an important natural mechanism causing short-term but significant changes in the hydrophysical, hydrochemical and biological characteristics of the marine environment by enriching surface waters with nutrients. The practical significance of the study lies in the possibility of using the results for forecasting the ecological state of the Black Sea coastal waters and assessing the impact of upwelling processes on the intensification of productive processes.

Key words: upwelling, phytoplankton, northwestern shelf, Black Sea.

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)