

ФІЗИЧНА ГЕОГРАФІЯ

УДК 551.465.7

[https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.2\(47\).344741](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.2(47).344741)

Ю. Ель Хадрі, PhD, старший викладач;

<https://orcid.org/0000-0003-3690-0927>

М. А. Берлінський, д-р геогр. наук, професор;

<https://orcid.org/0000-0002-4576-4958>

М. О. Сліже, канд. геогр. наук, викладач;

<https://orcid.org/0000-0002-6398-4188>

О. В. Дерик, старший викладач

К. А. Головченко, магістрант;

<https://orcid.org/0009-0006-1705-6344>

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,

кафедра океанології та морського природокористування,

вул. Змієнка Всеволода, 2, м. Одеса, 65082, Україна

magribinets@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ГІДРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБЕРЕЖНОЇ ЗОНИ ДЕЛЬТИ ДУНАЮ ПІД ВПЛИВОМ ПРОХОДЖЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ЦИКЛОНУ

У статті розглянута зміна швидкості та напрямку течії, температури та солоності води на поверхні, а також висоти морської поверхні відносно геоїду у прибережній зоні Дельти Дунаю, яка відбувалася на тлі проходження атмосферного циклону через північно-західну частину Чорного моря.

Ключові слова: авандельта Дунаю, взаємодія океану та атмосфери, рівень моря, температура, солоність.

ВСТУП

Постановка проблеми. Природна річкова дельта перебуває у стані постійної зміни. Сьогодні природні цикли зміни та відродження дельти річки Дунай обмежені діяльністю людини, такою як зведення дамб на річці для навігації та боротьби з повенями, активне судноплавство, інтенсивне використання на-вколишніх земель для сільськогосподарських потреб, викиди забруднюючих речовин та занесення чужорідних видів, заклало основу для сьогоденної екологічної кризи.

Водно-болотні угіддя Дельти Дунаю є цінним джерелом екосистемних послуг та середовищем рідкісних і зникаючих видів флори та фауни. Крім діяльності людини, такі природні чинники як штормові нагони і повені надають згубний вплив на дельту, завдаючи шкоди прибережним водно-болотним

угіддям. Багато районів дельти пронизані навігаційними каналами, які доставляють солону воду глибоко в солонуваті та прісноводні водно-болотні угіддя, порушуючи баланс солоності, необхідний рослинам, що утримують ґрунт водно-болотних угідь. Таке вторгнення морської води призводить до появи територій, які здаються здоровими на поверхні, але надто вразливими, щоб витримати додаткові навантаження, включаючи діяльність людини та зміну клімату.

Відновлення здорової, продуктивної дельти річки Дунай потребує різних відновлювальних рішень, у тому числі відновлення зв'язності річки з її дельтою шляхом землеустрою, створення та підтримки водно-болотних угідь та бар'єрних островів, впровадження природоорієнтованих рішень при управлінні річкою Дунай, а також вжиття заходів щодо підвищення стійкості спільноти.

Огляд попередніх досліджень. *Атмосферна циркуляція.* Формування циркуляції атмосфери над Україною у другій половині ХХ ст. у більшості випадків відбувалася під впливом областей низького тиску, таких як циклони і улоговини, які складають близько 43% випадків всіх баричних утворень, що спостерігаються протягом року. В той же час, утворення високого тиску, такі як антициклони, відроги і гребені відмічалися у 40% від загальної кількості утворень. Активність циклонів переважає в холодний період року з листопада по березень. У більшості випадків вони переміщуються на територію України із західної частини акваторії Чорного моря, району Нижнього Дунаю, півночі Італії, а також з районів Малої Азії (південні і південно-західні циклони) (Семенова, 2017).

Серед циклонів, траєкторії яких пролягають через південні, центральні та західні області України, 90% утворюються над Балканським півостровом, Адріатичним та Егейським морями, а також західною частиною Чорного моря та Нижньо-Дунайською низовиною, де формуються більшість циклонів цієї групи. Але, як показали дослідження (Балабух, 2004), наприкінці ХХ ст. відзначається майже вдвічі зменшення повторюваності переміщення циклонів з цього регіону на територію України. Внутрішньорічна зміна числа циклонів над Чорним морем у другій половині ХХ ст. демонструє найбільшу (до 17%) повторюваність цих утворень в січні. В той же час, у 58,5% випадків циклони, які утворюються у Середземному морі, переміщуються через західну частину Чорного моря (Клімат, 2003).

Циклонічна циркуляція протягом більшої частини року формує напрямок переважаючих вітрів в Чорноморському басейні (Ель Хадрі та ін., 2021), причому в західній частині акваторії Чорного моря переважають вітри північних напрямків, що відповідно впливає на формування циркуляції вод та хвилювання у цьому районі.

Дослідження (Voskresenskaya et al., 2022) можливих змін у циклонічній активності у Середземноморсько-Чорноморському басейні показало, що в середньому число зимових циклонів у Чорноморському регіоні зменшиться у середині ХХІ ст., але очікується до кінця ХХІ ст. при сценарії SSP5-8.5 зсув на

північ (на райони північного Причорномор'я) траєкторій західних циклонів, що проходять південними районами Європи (через Балканський півострів).

Аналогічні результати показало дослідження (Raible et al., 2018) циклонічної активності в зимовий період в Атлантико-Європейському регіоні в період 850-2100 рр. Основне зменшення повторюваності циклонів виявлено над Середземномор'ям. Подібне зменшення циклонічної активності в Середземномор'ї показали дослідження (Ulbrich et al., 2009; Raible et al., 2010; Zarra et al., 2013).

Процеси у Дельті Дунаю. Багаторічні спостереження за стоком річки Дунай показують, що середньорічний розподіл по рукавах дельти має наступний характер: Кілійський рукав – 65,6% від загального стоку, Георгіївський рукав – 20,3% і Сулінський – 14,1% (Романенко, 2001).

Однак діяльність людини та зміна кліматичних умов, а саме вітрового режиму, призводять до перерозподілу стоку у останнє десятиліття. Станом на 2013 р. середній стік Кілійського рукава становив 49% від стоку Дунаю у верхів'ї дельти; Георгіївський та Сулінський рукави перехоплюють відповідно 29% і 20% (Черой, 2013).

Рукав Бистрий є одним із найбільших водотоків дельти Дунаю, в сучасних умовах за середньої водності річки по ньому проходить 17–18% стоку Дунаю у вершині дельти. Але, як показали дослідження за короткі проміжки часу дія вітрів значно впливає на швидкісний режим потоку і рідкий стік, ніж зміна водності річки. При виникненні та розвитку слабких та помірних вітрів, а також при зміні напрямку вітру витрата рукава Бистрий за кілька годин може змінитися на 2–6%. Вітри південного, південно-західного, західного та північно-західного напрямків збільшують стік рукава, а північно-східний, східний, південно-східний та північний напрямки зменшують його (Гопченко, Черой, 2008).

Аналіз вітрового режиму дельти Дунаю за багаторічний період (1945–2000 рр.) показав, що для всіх гідрометеорологічних станцій і постів у дельті характерно переважання вітрів північних і південних румбів. На частку північно-західного, північного та північно-східного вітрів у сумі припадає 40,75% випадків, а південно-східні, південні та південно-західні вітри с сумі складають 32,09% випадків (Вихованец, 2003).

Для узмор'я Дунаю характерні слабкі та помірні вітри зі швидкістю 5–10 м/с. При цьому середня кількість днів на рік із сильним вітром (≥ 10 м/с) становить 87 днів, а зі штормовим вітром (≥ 15 м/с) – 81 день (Христюк, 2014).

Дослідження особливостей гідрологічних умов, а також морфології Дельти Дунаю в останні десятиліття показало, що відзначається зменшення об'єму припливу води в дельту та море, а також змінився міжрічний розподіл стоку. Основною причиною скорочення стоку наносів стало завершення будівництва водоймищ Залізні Ворота 1 і 2, що затримують зважені наноси і не пропускають їх у дельту річки, а також локальне регулювання стоку численними ставками та водосховищами на притоках Дунаю. У нових гідрологічних умовах, що

склалися, висування дельти у бік моря практично припинилося, посилилася абразія морського краю дельти хвилями і вздовж береговими течіями, а також посилюється накопичення наносів (барів) в гирлах проток, у тому числі і в руслі Бистрого (Глибоководний фарватер) (Starodubtsev, 2013).

Зміни у землекористуванні в українській частині Дельти Дунаю знаходить свій відгук у середовищі проживання та площі водно-болотних угідь, так в останнє десятиліття відзначається збільшення площ відведених під міську забудову та сільськогосподарські угіддя, при цьому спостерігається зменшення площі території зайнятої високою рослинністю та водно-болотними угіддям. В останні десятиліття також відзначається зміна кліматичних умов у районі дельти у бік посушливих (Slizhe et al., 2023).

Метою роботи є визначення кількісних показників зміни гідрологічних характеристик прибережної акваторії Дельти Дунаю під впливом проходження атмосферного циклону в поточних кліматичних умовах.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження просторово-часового розподілу гідрологічних характеристик виконано на основі фізико-статистичного методу, аналіз циркуляційних умов виконано методом синоптичного аналізу.

Аналіз гідрологічних характеристик прибережних вод виконано в точках, розташованих в акваторії авандельти Дунаю (рис. 1).

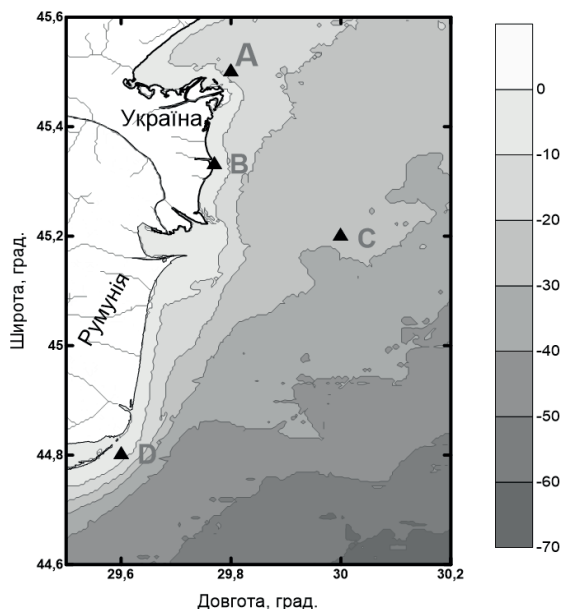


Рис. 1. Район дослідження: ▲ – розташування точок, суцільна заливка – розподіл глибин

Для аналізу розвитку синоптичної ситуації використовувалися карти приземного аналізу за 04–10.02.2020 р. за 00 UTC (The World, 2025). Аналіз метеопказників виконано за даними спостережень на метеостанції Вилкове.

Для аналізу гідрологічних характеристик були використані добові та середньомісячні багаторічні дані про складові швидкості течій u і v , температуру поверхні моря (ТПМ) та солоність води на поверхні моря (S), висоту морської поверхні відносно геоїду z , отримані з набору даних Global Ocean Physics Reanalysis, розміщені на сайті (Copernicus, 2025).

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Метеорологічні характеристики та синоптичні умови. Синоптична ситуація в районі дослідження характеризувалася розвитком циклонічної активності у період 05–06.02.2020 р. над акваторією Чорного моря та прилеглими територіями.

Висотне баричне поле: 04.02.2020 г. над північно-східною Атлантикою розташувався висотний баричний гребінь. Через центральну Європу проходила висотна барична улоговина, пов'язана за осередком циклонічної активності над Гренландським морем та північню ЄТР. ВФЗ мала меридіональну спрямованість над Західною Європою та квазізональну над акваторією Чорного моря. 05.02.2020 р. висотна улоговина поширилася на південь до середземноморського узбережжя Північної Африки. У наступні сутки висотна улоговина углиблювалася та змістилася на схід. 07.02.2020 р. її вісь розташовувалася над Чорним морем та ЄТР. Над територією Центральної Європи встановився поширений висотний баричний гребінь. ВФЗ мала квазімеридіональну спрямованість. В період 08–10.02.2020 р. висотний баричний гребінь змістився на схід та його вісь була орієнтована з південного заходу на північний схід, та простягалася від центральної частини Середземного моря до північного Уралу.

Біля поверхні землі синоптичні процеси у районі дослідження розвивалися наступним чином (рис. 2): 04.02.2020 г. в 00 UTC над акваторією Чорного моря розташовувалась барична улоговина, вісь якої була орієнтована з північного сходу на південний захід, в якій пролягав холодний фронт, що проходив через південно-східну частину моря та узбережжя Туреччини. Над північно-західною частиною Чорного моря (ПЗЧМ) відзначалися вітри західної складової. На ст. Вилкове вночі вітер мав північно-західний та західний напрямок 1–3 м/с, у другу половину доби відбулося посилення швидкості вітру до 7 м/с напрямком південний. Атмосферний тиск о 00 UTC становив 1011,3 гПа.

05.02.2020 р. на територію західного Причорномор'я та західну частину Чорного моря змістився циклон, який сформувався у попередню добу на полярному фронті. За класифікацією Л. Богатир даний циклон відноситься до групи західних циклонів, які переміщуються півднем Західної Європи. Ці циклони зміщуються із заходу на схід з північною складовою. Найбільша повторюваність цих циклонів спостерігається в зимовий і осінній сезони, загальна

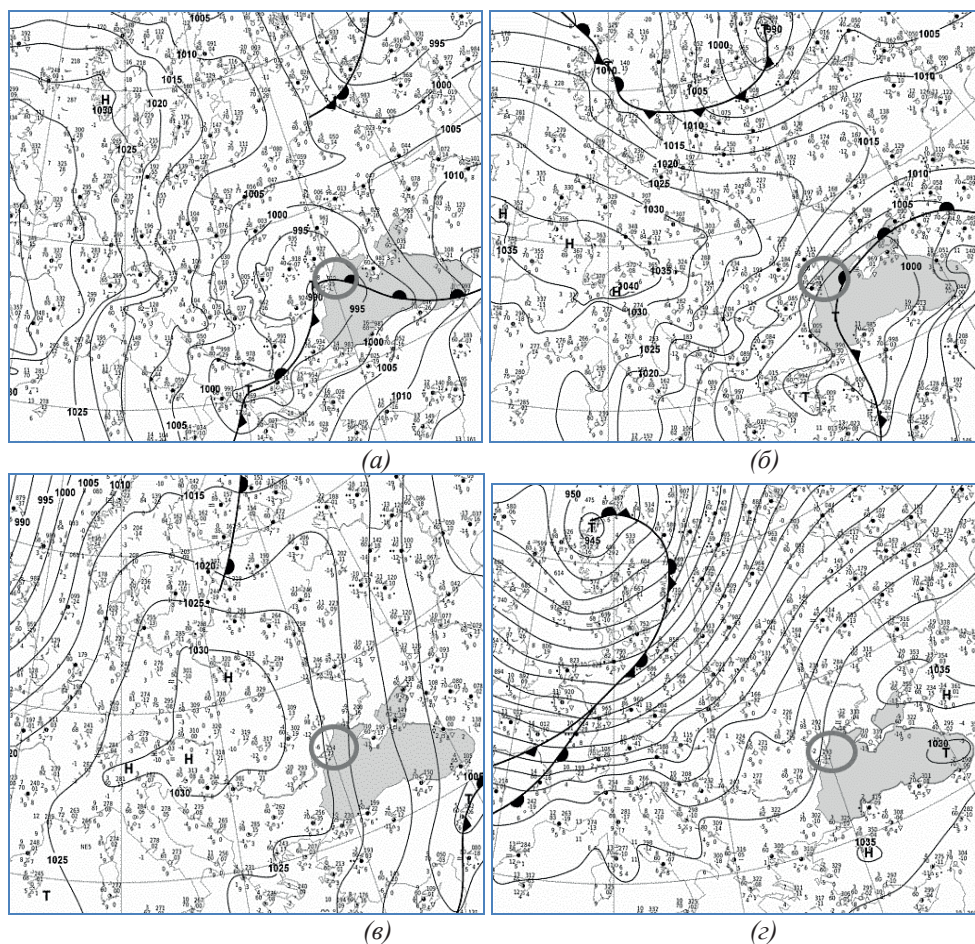


Рис. 2. Приземний аналіз о 00 UTC: (а) – 05.02.2020 р., (б) – 06.02.2020 р., (в) – 08.02.2020 р., (г) – 10.02.2020 р. (колом виділено район дослідження)

повторюваність у другій половині XX ст. складала 2 цикли на рік. Центр циклону 05.02.2020 р. о 00 UTC розташовувався над м. Рені, тиск у центрі дорівнював 990 гПа і він був окреслений трьома замкнутими ізобарами. Через південь ПЗЧМ проходив теплий атмосферний фронт. Над акваторією ПЗЧМ о 00 UTC відзначалися південні вітри. На ст. Вилкове вночі спостерігався південний вітер 6 м/с, вранці він змінився на західно-північно-західний (2–3 м/с), а з 15 UTC встановився північний вітер (10 м/с); тиск знизився до 992,6 гПа.

06.02.2020 р. о 00 UTC центр циклону розташовувався над західною половиною Чорного моря. Він почав заповнюватись і був окреслений однією замкнутою ізобарою. Над ПЗЧМ, яка знаходилася під дією північно-західної периферії циклону сформувалася зона підвищених градієнтів приземного тиску, з якою було пов'язано посилення швидкості вітру зі зміною напрямку на

північний. На ст. Вилкове 00–18 UTC спостерігався північний вітер (14 м/с). О 21 UTC швидкість вітру зменшилася до 1 м/с напрямом західний; атмосферний тиск о 00 UTC дорівнював 1002,5 гПа

07.02.2020 г. над ПЗЧМ проходив теплий фронт, пов'язаний з циклоном над центром ЄТР. В районі дослідження відзначався північно-західний вітер. На ст. Вилкове у нічний час спостерігався вітер західної складової (1–3 м/с); з 09 UTC встановився північний вітер (3–6 м/с); тиск збільшився до 1015,1 гПа.

08.02.2020 р. акваторія Чорного моря знаходилася під дією перехідної зони між циклоном із центром над східною Туреччиною (тиск у центрі 1002 гПа) та антициклоном над Південно-Східною Європою (тиск у центрі 1033,0 гПа). Над ПЗЧМ було сформовано повітряні потоки північного та північно-західного напрямку. На ст. Вилкове спостерігався північний та північно-західний вітер (3–7 м/с), тиск о 00 UTC становив 1024, 8 гПа.

09.02.2020 р. на Балканський п-ів змістився антициклон (тиск центрі 1033,1 гПа). ПЗЧМ знаходилася у полі дії баричного гребеня, вісь якого була орієнтована з південного заходу на північний схід та проходила через територію України. Баричні градієнти над Чорним морем зменшилися, що призвело до зниження швидкості вітру. На ст. Вилкове вночі зберігався північно-західний вітер (2 м/с), в 12 UTC він змінився на південний (до 1 м/с); приземний тиск в 00 UTC становив 1031,5 гПа.

10.02.2020 р. в результаті перебудови баричного поля акваторія Чорного моря перебувала під дією малоградієнтного поля підвищеного тиску, що призвело до зменшення швидкості та зміни напрямку вітру. На ст. Вилкове відзначався південний вітер, який у нічні часи мав швидкість 3–4 м/с, а у другій половині доби – 7–8 м/с. Атмосферний тиск о 00 UTC становив 1030,5 гПа.

Гідрологічні характеристики. Розвиток синоптичних процесів супроводжувався зміною гідрологічних характеристик у прибережній частині акваторії Дельти Дунаю.

Відомо, що течії на гирловому узмор'ї переважно визначаються стоком річки та його розподілом по рукавам дельти, вітром, припливами, градієнтами густини води, хвилюванням. Так, середні багаторічні значення швидкості та напрямки течії у лютому становлять: у точках А, В і С – 5,53 см/с, 7,46 см/с і 2,11 см/с, відповідно, при напрямі південно-східної чверті; у точці D швидкість течії становить 9,78 см/с, напрямом південно-західної чверті. Як видно, цей розподіл швидкості та напрямку течій сформовано в основному під впливом річкового стоку Дунаю. Однак в окремі дні ці значення можуть суттєво відрізнятися від середніх багаторічних значень, що обумовлено впливом інших гідрологічних та атмосферних факторів.

Аналіз складових швидкості течії на поверхні моря показав, що 04.02.2020 р. у всіх точках спостерігалася течія з напрямком північно-східної чверті (табл. 1) при формуванні південних вітрів над ПЗЧМ. 05.02.2020 р. після зміни напрямку вітру на північний відбулася зміна напрямку течії в точках А, В, С на півден-

но-західну чверть, у точці D на південно-східну чверть. Зональна складова *u* знаходилася в межах від -2,5 до -2,9 см/с у точках А, В, С та 3,7 см/с у точці D; меридіональна складова *v* від -5,2 см/с у точці D до -14,7 см/с у точці В.

06.02.2020 р. при посиленні швидкості вітру до 14 м/с відзначалися найбільші швидкості течії у всіх точках при напрямку південно-західної чверті. Складова *u* в точках С і D приймала значення -31,0 і -28,0 см/с, а складова *v* до -49,2 і -64,6 см/с, відповідно.

Таблиця 1

Складові швидкості течії *u* і *v* (см/с)

Точка	04.02	05.02	06.02	07.02	08.02	09.02	10.02	Середнє багаторічне у лютому
<i>u</i>								
A	5,9	-2,5	-8,9	-0,3	-1,9	4,8	6,1	4,0
B	8,5	-2,9	-9,1	1,6	1,6	5,5	6,7	0,5
C	14,0	-2,6	-31,0	-8,2	-5,4	-1,3	12,6	0,8
D	20,5	3,7	-28,0	-8,1	-4,8	4,4	19,8	-8,8
<i>v</i>								
A	11,7	-12,3	-27,1	-1,6	-5,7	5,9	16,8	-2,4
B	17,9	-14,7	-38,3	-1,8	-4,0	6,8	20,8	-8,0
C	23,3	-6,7	-49,2	-12,6	-16,7	-2,7	19,0	-0,3
D	25,7	-5,2	-64,6	-21,4	-17,3	-1,5	27,8	-6,4

У наступні дві доби при збереженні північного вітру (6–7 м/с) відзначалося збереження напрямку течії при зменшенні її швидкості до -8,2 см/с складова *u* і до -17,3 см/с складова *v* (крім точки В, де течія мала напрямок південно-східної чверті).

10.02.2020 р. коли на ст. Вилкове відзначався південний вітер (8 м/с) у всіх точках встановилася течія напрямку північно-східної чверті: величина *u* була в межах 6,1–19,8 см/с, величина *v* від 16,8 до 27,8 см/с.

Таким чином, упродовж періоду 04–10.02.2020 р. в районі дослідження відбувалася зміна синоптичних умов, що супроводжувалося зміною циркуляції повітря. При проходженні циклону 05–06.02.2020 р. встановився північний вітер (14 м/с), при зміні напрямку течії з північно-східної на південно-західну чверть при посиленні модуля швидкості до 28,5 см/с (у точці А) і 70,4 см/с (у точці D). 07.02.2020 р. швидкості течії зменшилась (модуль швидкості знаходився в межах від 1,6 см/с (у точці А) до 22,9 см/с (у точці D), та 10.02.2020 р. напрямку течії змінився на північно-східну чверть зі швидкістю від 17,9 см/с (у точці А) до 34,1 см/с (у точці D).

Аналіз висоти морської поверхні відносно геоїду z показав, що 04–10.02.2020 р. у всіх точках z була нижче середніх багаторічних значень на 0,65–0,66 м. У період 04–06.02.2020 р. відзначалося збільшення z в точках А, В, D на 0,14–0,16 м, а в точці С на 0,06 см (рис. 3а). Після чого наступної доби z знизився до значень близьких 04.02.2020 р.

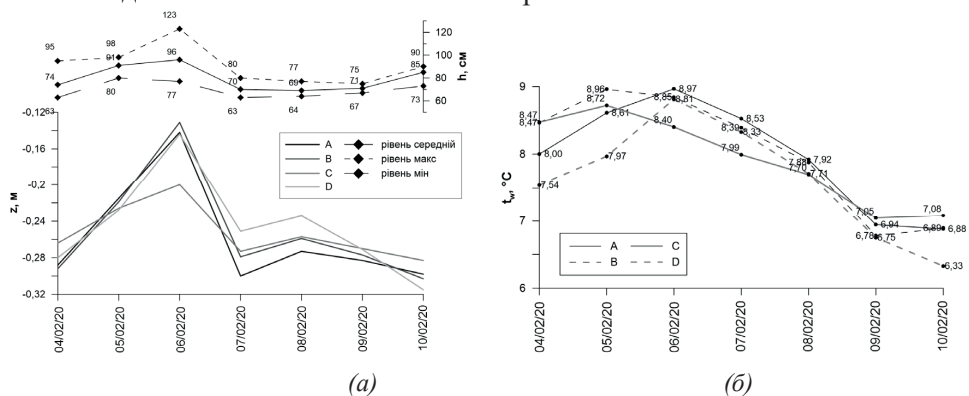


Рис. 3. Висота морської поверхні відносно геоїду z (м) в точках А, В, С, D та рівень води h (см) у річці Дунай на ст. Вилкове (а) і температура води на поверхні моря ($^{\circ}\text{C}$) в точках А, В, С, D (б)

Зміна z в період 04–08.02.2020 р. має схожий характер із зміною рівня h річки Дунай на ст. Вилкове. Середньодобове h 04.02.2020 р. було нижче середньомісячного на 0,13 м та становило 0,74 м. Однак 06.02.2020 р. h збільшилося на 0,22 м (добовий максимум h збільшився на 0,28 м та досяг 1,23 м). При проходженні циклону 05.02.2020 р. на ст. Вилкове випало 9,0 мм опадів (6 мм в строк 00 UTC), що супроводжувалося збільшенням h в період 01–03 UTC до 0,98 м. В цей період на станції відзначався південний вітер (6 м/с). Наступної доби (06.02.2020 р.) на станції випало 39,8 мм (понад половину місячного значення) і спостерігалось посилення вітру до 14 м/с північний напрямком. Максимум h спостерігався 06.02.2020 р. у 06 UTC (1,23 м – місячний максимум у лютому 2020 р.), після чого h зменшився. Після випадання опадів о 12 UTC спостерігався вторинний максимум h (1,0 м), після чого до кінця доби h досяг 0,77 м, що нижче середньомісячного значення (0,87 м). Отже, на ст. Вилкове максимальних значень h досяг при сумісному впливі опадів і посиленні швидкості вітру північного напрямку, що сприяло проникненню вод з Чорного моря в Кілійську дельту. Причому повторні опади (12 UTC) аналогічної кількості при зменшенні швидкості вітру до 7 м/с (північного напрямку) не викликали збільшення h до значень близьких максимальним у цей день. 07.02.2020 р. h знизився на 0,26 м до величини 0,7 м, що було нижче на 0,04 м рівня 04.02.2020 р. Потрібно додати, що 10.02.2020 р. у точках дослідження у прибережній зоні z продовжувала знижуватися, тоді як на ст. Вилкове відзначалося збільшення h .

Аналіз ТПМ показав, що у всі дні досліджуваного періоду вона перевищувала середнє багаторічне значення на величину від 2,2 °C у точці D до 3,08 °C у точці A (рис. 3б). При проходженні циклону над районом дослідження (05.02.2020 р.) у точках B та C, а також 06.02.2020 р. у точках A та D відзначалося збільшення ТПМ порівняно з 04.02.2020 р. на значення від 0,97 °C у точці A до 1,27 °C у точці D. 09.02.2020 р. ТПМ зменшилася на 2,02–2,19 °C у всіх точках, крім точки C, де ТПМ знизилася на 1,68 °C.

Такі зміни ТПМ відбувалися на фоні зменшення приземної температури повітря під час проходження циклону. Так, середньодобова температура повітря на ст. Вилкове зменшилася на 8,8 °C 06.02.2020 р. і складала $t_{\text{пов}} = -1,3$ °C, а в наступні дві доби в результаті затоки холодного повітря в тилу циклону знизилася ще на 3,2 °C 08.02.2020 г. ($t_{\text{пов}} = -4,2$ °C).

Солоність води на поверхні S 04.02.2020 р. знаходилася в межах від 14,87 ‰ (точка D) до 15,87 ‰ (точка C) і в середньому у досліджуваний період була вищою за кліматичну норму в точках B, C і D на 3,72 ‰, 0,03 ‰ і 0,96 ‰, відповідно; і нижче на 0,79 ‰ у точці A (рис. 4). Відомо, що для річки Дунай ізохаліна 15 ‰ добре характеризує стан фронту річкових вод.

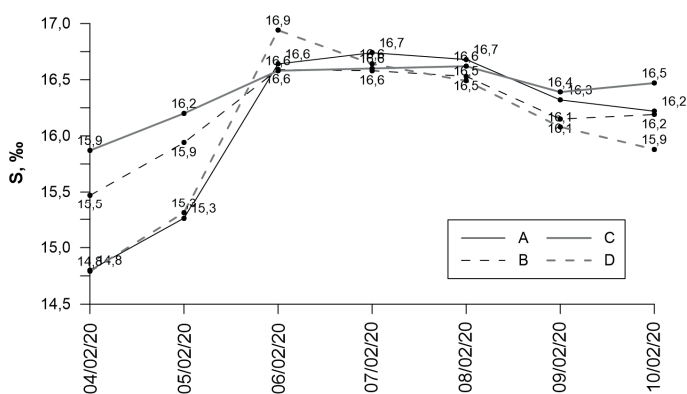


Рис. 4. Солоність води на поверхні моря (‰) в точках A, B, C, D

Протягом 04–06.02.2020 р. S збільшилася на 0,71 ‰ (у точці C) та 2,15 ‰ (у точці D), і становила 16,58 ‰ та 16,94 ‰, відповідно. 09.02.2020 р. S зменшилася на 0,19 ‰ (у точці C) і 0,86 ‰ (у точці D), але загалом була вищою за значення 04.02.2020 р. Тобто найменші коливання відзначалися у зовнішній частині авандельти Дунаю, а найбільші в районі Георгіївського рукава. Такі зміни у S , які відбувалися на фоні випадіння атмосферних опадів, пов'язані з надходженням більш солоних вод з районів відкритого моря до узбережжя.

ВИСНОВКИ

З проходженням циклонів та атмосферних фронтів пов'язане посилення швидкості вітру в даному регіоні. Так, при формуванні сильного вітру (14 м/с) напрямок течій у прибережній зоні відхиляється від середніх багаторічних значень та відзначається значне зростання швидкості течії.

Результати аналізу показали, що проходження циклону над районом Дельти Дунаю супроводжувалося виникненням короткоперіодичних коливань у рівні моря та рівні води у річці Дунай, а також у гідрологічних показниках у прибережній акваторії дельти. Формування течії напрямку південно-західної чверті з посиленням швидкості викликало надходження більш солоних вод у прибережну зону.

Після проходження циклону та встановлення малоградієнтного поля підвищеного тиску відбулось зниження швидкості течії та рівня моря у прибережній зоні, а також зменшення ТПМ та солоності води, що свідчить про посилення впливу стоку Дунаю при формуванні гідрологічних характеристик вод прибережної акваторії у ці дні.

Зменшення у повторюваності випадків переміщення циклонів через північно-західне Причорномор'я, що прогнозується у другій половині XXI століття, призведе до зміни у розподілі повторюваності швидкості вітру і як наслідок циркуляції вод у прибережній акваторії, а також переважаючих умов, при яких відбувається формування режиму вод у цьому районі.

Подяки. Дослідження виконано за проектом «Restoration of the Danube river basin waters for ecosystems and people from mountains to coast – DANUBE4all». Автори висловлюють подяку Європейському виконавчому агентству з питань клімату, інфраструктури та навколишнього середовища (CINEA) за надання фінансової підтримки для цього дослідження в рамках гранту 101093985.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Балабух В. О. Траєкторії циклонів, що зумовлюють небезпечну і стихійну кількість опадів в Україні у теплий період року. *Наук. праці УкрНДІГМІ*. 2004. Вип. 253. С. 103–119. https://old.uhmi.org.ua/pub/np/253/9_Balabuch.pdf
- Выхованец Г. В. Влияние эолового фактора на развитие Дельты Дуная. *Вісник Одеського національного університету. Серія: Екологія*. 2003. Т. 8, вип. 11. С. 29–54. <https://dspace.onu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/ae18feb4-d97e-43fd-9ef5-bc109cc70df0/content>
- Гопченко Е. Д., Черой А. И. Временная изменчивость скорости течения и мутности воды в рукаве Быстрый килийской Дельты Дуная. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2008. Вип. 6. С. 122–128. http://bulletin.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2008/08/16-Gopchenko_Cheroy.pdf
- Ель Хадрі Ю., Берлінський М. А., Сліже М. О. Сучасні кліматичні зміни в Чорноморському регіоні. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Серія: Екологія*. 2021. Вип. 25. С. 8–20. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-25-01>
- Клімат України : монографія / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Видавництво Раєвського, 2003. 343 с.
- Романенко В. Д. Основи гідроекології : підручник. Київ : Обереги, 2001. 728 с.
- Семенова І. Г. Синоптичні та кліматичні умови формування посух в Україні : монографія. Харків : Панов А.М., 2017. 236 с.

Христюк Б. Краткосрочное прогнозирование уровней воды в Килийском рукаве Дуная. *Energetika*. 2014. Т. 60, nr. 1. Р. 69–75.

Черой О. І. Перерозподіл стоку по рукавах Дельти Дунаю в умовах існування судноплавних каналів. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2013. № 13. С. 176–182. <http://uhmj.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2013/10/24.pdf>

Copernicus Marine Data Store. 2025. URL: <https://marine.copernicus.eu/> (дата звернення: 29.06.2025).

Raible C. C., Messmer M., Lehner F., Stocker T. F., Blender R. Extratropical cyclone statistics during the last millennium and the 21st century. *Clim. Past*. 2018. Vol. 14. P. 1499–1514. <https://doi.org/10.5194/cp-14-1499-2018>

Raible C. C., Ziv B., Saaroni H., Wild M. Winter synoptic-scale variability over the Mediterranean Basin under future climate conditions as simulated by the ECHAM5. *Clim. Dynam.* 2010. Vol. 35. P. 473–488. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0678-5>

Slizhe M., Safranov T., Berlinsky N., El Hadri Y. Impact of climate change factor on the resource (providing) ecosystem services of the Lower Danube wetlands. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*. 2023. Vol. 59. P. 307–319. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-23>

Starodubtsev V. Changes in the Danube Delta according to remote sensing data by Landsat Satellite. *Arid Ecosystems*. 2013. Vol. 3, no. 4. P. 258–262. <https://doi.org/10.1134/S2079096113040112>

The World in Weather Charts. 2025. URL: <https://www.wetter3.de/> (дата звернення: 29.06.2025).

Ulbrich U., Leckebusch G. C., Pinto J. G. Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theor. Appl. Climatol.* 2009. Vol. 96. P. 117–131. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0083-8>

Voskresenskaya E. N., Maslova V. N., Lubkov A. S., Zhuravskiy V. Y. Present and future changes in winter cyclonic activity in the Mediterranean-Black Sea region in the 21st century based on an ensemble of CMIP6 models. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. P. 1573. <https://doi.org/10.3390/atmos13101573>

Zappa G., Shaffrey L. C., Hodges K. I., Sansom P. G., Stephenson D. B. A multimodel assessment of future projections of North Atlantic and European extratropical cyclones in the CMIP5 climate models. *J. Climate*. 2013. Vol. 26. P. 5846–5862. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00573.1>

REFERENCES

Balabukh, V. O. (2004). Trajektorii tsykloniv, shcho zumovliuiut nebezpechnu i stykhiinu kil'ist opadiv v Ukraini u teplyi period roku [Trajectories of cyclones that cause dangerous and spontaneous precipitation in Ukraine in the warm period of the year]. *Scientific Works of the Ukrainian National Research Institute of Meteorology and Geophysics*, (253), 103–119. https://old.uhmi.org.ua/pub/np/253/9_Balabukh.pdf [in Ukrainian].

Vykhovanets, G. V. (2003). Vliyanie yeolovogo faktora na razvitie Del'ty Dunaya [The influence of the aeolian factor on the development of the Danube Delta]. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Ekolohiia*, 8(11), 29–54. <https://dspace.onu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/ae18feb4-d97e-43fd-9ef5-bc109cc70df0/content> [in Russian].

Hopchenko, E. D., & Cheroy, O. I. (2008). Vremennaya izmenchivost' skorosti techeniya i mutnosti vody v rukave Bystryi Kiliyskoy Del'ty Dunaya [Temporal variability of the flow velocity and water turbidity in the Bystryi branch of the Danube Delta]. *Visnyk Odeskoho Derzhavnoho Ekolohichnoho Universytetu*, (6), 122–128. http://bulletin.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2008/08/16-Gopchenko_Cheroy.pdf [in Russian].

El Hadri, Y., Berlinsky, N. A., & Slizhe, M. O. (2021). Suchasni klimatychni zminy v Chornomorskomu rehioni [Modern climate change in the Black sea region]. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (25), 8–20. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-25-01> [in Ukrainian].

Lipinsky, V. M., Dyachuk, V. A., & Babichenko, V. M. (Eds.). (2003). *Klimat Ukrainy* [Climate of Ukraine] (343 p.). Kyiv: Raievsky. [in Ukrainian].

Romanenko, V. D. (2001). *Osnovy hidroekolohii* [Fundamentals of hydroecology] (728 p.). Kyiv: Oberehy. [in Ukrainian].

Semenova, I. G. (2017). *Synoptychni ta klimatychni umovy formuvannia posukh v Ukraini* [Synoptic and climatic conditions of drought formation in Ukraine] (236 p.). Kharkiv: Panov A. M. [in Ukrainian].

Khrystyuk, B. (2014). Kratkosrochnoe prognozirovanie urovney vody v Kiliyskom rukave Dunaya [Short-term forecasting of water levels in the Khilia branch of the Danube]. *Energetika*, 60(1), 69–75. [in Russian].

Cheroy, O. I. (2013). Pererозpodil stoku po rukavakh Del'ty Dunaiu v umovakh isnuvannia sudnoplavnykh kanaliv [Redistribution of runoff along the branches of the Danube Delta in the conditions of the existence of navigable channels]. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, (13), 176–182. <http://uhmj.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2013/10/24.pdf> [in Ukrainian].

Copernicus Marine Data Store. (2025). Retrieved June 29, 2025, from <https://marine.copernicus.eu/>

Raible, C. C., Messmer, M., Lehner, F., Stocker, T. F., & Blender, R. (2018). Extratropical cyclone statistics during the last millennium and the 21st century. *Clim. Past.*, 14, 1499–1514. <https://doi.org/10.5194/cp-14-1499-2018>

Raible, C. C., Ziv, B., Saaroni, H., & Wild, M. (2010). Winter synoptic-scale variability over the Mediterranean Basin under future climate conditions as simulated by the ECHAM5. *Clim. Dynam.*, 35, 473–488. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0678-5>

Slizhe, M., Safranov, T., Berlinsky, N., & El Hadri, Y. (2023). Impact of climate change factor on the resource (providing) ecosystem services of the Lower Danube wetlands. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (59), 307–319. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-23>

Starodubtsev, V. (2013). Changes in the Danube Delta according to remote sensing data by Landsat Satellite. *Arid Ecosystems*, 3(4), 258–262. <https://doi.org/10.1134/S2079096113040112>

The World in Weather Charts. (2025). Retrieved June 29, 2025, from <https://www.wetter3.de/>

Ulbrich, U., Leckebusch, G. C., & Pinto, J. G. (2009). Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theor. Appl. Climatol.*, 96, 117–131. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0083-8>

Voskresenskaya, E. N., Maslova, V. N., Lubkov, A. S., & Zhuravskiy, V. Y. (2022). Present and future changes in winter cyclonic activity in the Mediterranean-Black Sea region in the 21st century based on an ensemble of CMIP6 models. *Atmosphere*, 13, 1573. <https://doi.org/10.3390/atmos13101573>

Zappa, G., Shaffrey, L. C., Hodges, K. I., Sansom, P. G., & Stephenson, D. B. (2013). A multimodel assessment of future projections of North Atlantic and European extratropical cyclones in the CMIP5 climate models. *J. Climate*, 26, 5846–5862. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00573.1>

Стаття надійшла 12.11.2025 р.

**Y. El Hadri,
M. A. Berlinskyi,
M. O. Slizhe,
O. V. Deryk,
K. A. Holovchenko,**

Odesa I. I. Mechnikov National University
Department of Oceanology and Marine Management
2 Zmiiienka Vsevoloda St, Odesa, 65082, Ukraine

FEATURES OF THE HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS FORMATION OF THE DANUBE DELTA COASTAL ZONE UNDER THE INFLUENCE OF THE ATMOSPHERIC CYCLONE PASSAGE

Abstract

Problem Statement and Purpose. The natural delta is in a state of constant change. Today, the natural cycles of change and regeneration of the Danube River Delta have been limited by human activities such as damming the river for navigation and flood control, which laid the foundation for today's ecological collapse and coastal erosion. Restoring a healthy, productive Danube Delta requires a variety of restoration solutions, including reconnecting the river to its delta through land management, restoring and supporting wetlands and barrier islands, implementing nature-based solutions in managing the Danube River, as well as taking measures to increase public resilience.

The aim of the study is to determine quantitative indicators of changes in the hydrological characteristics of the Danube Delta coastal waters under the influence of the passage of an atmospheric cyclone in current climatic conditions.

Data & Methods. The analysis of hydrological characteristics was performed on the basis of daily data and monthly average multi-year data on current velocity, sea surface temperature and sea surface salinity, and sea surface height above geoid from the Global Ocean Physics Reanalysis product of the Copernicus Marine Service dataset. To analyze the development of synoptic processes, surface analysis maps for the period 04–10.02.2020 at 00 UTC and the results of observations at the Vylkove weather station were used.

Results. The passage of the cyclone over the Danube Delta region was accompanied by the occurrence of short-period fluctuations in sea level and water level in the Danube River, as well as in hydrological parameters in the coastal waters of the delta. The formation of a current in the direction of the southwestern quarter with an increase in speed caused the flow of more saline waters into the coastal zone. After the passage of the cyclone and the establishment of a low-gradient field of high pressure, there was a decrease in the current speed and sea level in the coastal zone, as well as a decrease in the SST and water salinity, which indicates an increase in the influence of the Danube runoff in the formation of hydrological characteristics of the waters of the coastal waters on these days. The decrease in the frequency of cyclones in the northwestern Black Sea region, which is predicted for the second half of the 21st century, will lead to a change in the distribution of the frequency of wind speeds and, as a result, the circulation of waters in the coastal waters.

Keywords: Danube Delta, ocean-atmosphere interaction, sea level, temperature, salinity.