

**Ю.П. Ільїн**ORCID: 0000-0002-7717-6472  
ypilyin@gmail.com**Д.О. Клебанов**ORCID: 0009-0000-9227-8189  
den@uhmi.org.uaУкраїнський гідрометеоро-  
логічний інститут  
ДСНС України та НАН України,  
Київ

УДК 551.465+551.468.6

DOI: <https://doi.org/ua/10.15407/Meteorology2025.08.052>

## СЕЗОННА ТА ДОВГОТРИВАЛА МІНЛИВІСТЬ СОЛОНОСТІ В РАЙОНІ ВЗАЄМОДІЇ РІЧКОВИХ І МОРСЬКИХ ВОД ЗА ДАНИМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НА БЕРЕГОВИХ СТАНЦІЯХ УКРАЇНИ

Застосовано статистичні методи з метою вивчення сезонного ходу та довготривалої мінливості солоності як показника взаємодії річкових та морських вод на шельфі Північно-західної частини Чорного моря. Порівняння статистичних показників для двох послідовних кліматичних періодів 1960–1990 і 1991–2020 років засвідчило зменшення середньої солоності в порту Одеса на понад 0,4 ‰ і збільшення солоності в Очакові внаслідок зменшення стоку Дніпра майже на 0,4 ‰. Ці ефекти проявилися на фоні загального лінійного тренду зменшення солоності у Чорному морі через кліматичне зменшення випаровування із морської поверхні. Трансформація сезонного ходу солоності в Одесі в період 1991–2020 рр. порівняно з попереднім 30-річчям полягає у загальному зменшенні солоності в літньо-осінній сезон та перенесенні максимуму з липня на вересень. Солоність в Очакові у вересні значно зросла (на 0,5 ‰). Кореляційний аналіз рядів середньомісячних величин солоності і витрат води річок продемонстрував, що максимальні кореляції між солоністю і стоком Дніпра отримані для нульової затримки, тому що просування розпріснених вод від Кінбурнської протоки до Одеської затоки і назад відбувається впродовж кількох днів, але менше місяця. Значуща кореляція зберігається також при затримках 1 і 2 місяці, що показує значну інерційність солоності і її взаємодії зі стоком Дніпра. Спектральний аналіз найдовшого ряду середньої місячної солоності в Одесі (1951–2020 рр.) виявив 4 значущих гармоніки, які відповідають основним періодам мінливості: піврічному, 1-річному, 4-річному та 35-річному. Перші два періоди відповідають сезонній мінливості, а період 4 роки — міжрічній. Довготривалі зміни солоності з періодом 35 років пов'язані з відповідними коливаннями складових кліматичної системи, які сприяють змінам випаровування із морської поверхні. Вейвлет-аналіз дозволив встановити, що зростання потужності 4-річної гармоніки міжрічних коливань солоності в порту Одеса відбувається у періоди впливу явища Ель-Ніньо (ЕН), причому максимум потужності може приходитися на інтервал між сусідніми випадками або безпосередньо підчас ЕН. Відповідно, зменшення цієї величини починалося після явища Ла-Нінья (ЛН) з мінімумом між попереднім ЛН і наступним ЕН, або між двома послідовними випадками ЛН.

**Ключові слова:** солоність води, часові ряди, річковий стік, кореляційний аналіз, спектральний аналіз, вейвлет, міжрічна мінливість, кліматичні зміни.

### ВСТУП

Солоність є одним з важливіших показників гідрологічного режиму океанів і морів, позаяк її розподіл не тільки впливає на поле густини, а отже й на термохалінну циркуляцію вод, але й служить пасивним трасером переносу води в районах гирлових областей річок та гідрологічних фронтів. Солоність може також розглядатися як один з індикаторів кліматичних змін у морях, тому що її величина визначається, перш за все, співвідношенням потоків прісних вод (материкового стоку, атмосферних опадів та випаровування з морської поверхні), які у свою чергу залежать від глобальних та регіональних коливань гідрометеорологічних умов (Липченко і др., 2006; Ильин и др., 2012). Головними причинами коливань солоності біля берегів Північно-західної частини Чорного моря (ПнЗЧМ) є річковий стік,

адвекція поверхневих та глибинних вод відкритого моря, а також (меншою мірою) різниця між атмосферними опадами та випаровуванням на морській поверхні.

Сезонна та міжрічна мінливість солоності вод біля берегів України, а також у відкритому морі поблизу головних джерел прісної і солоної води, досліджені у Розділі 6 монографії (Ильин и др., 2012) за даними до 2010 року включно. Надходження трансформованих річкових вод є найбільш потужним чинником формування гідрологічного режиму шельфу та прибережних вод ПнЗЧМ (Большаков, 1970; Ильин, 1999, 2006; Yankovsky, Lemeshko & Ilyin, 2004; Ильин и др., 2012).

Нещодавній аналіз попередніх досліджень поширення і трансформації річкових вод у Чорному морі, а також застосування до цієї тематики сучас-

них уявлень про структуру і динаміку плавучих плямів (шлейфів) розпріснених вод річок та естуаріїв наведено в роботі (Ільїн, 2023а) щодо Дніпровсько-Бузької гирлової області. На основі даних багатолітніх берегових та експедиційних спостережень розглянуто структуру і динаміку перехідних вод у системі Дніпровсько-Бузького лиману (ДБЛ) до руйнування Каховської ГЕС. Побудовано середні річні й сезонні карти та вертикальні розрізи температури і солоності. Проаналізовано головні чинники формування та поширення перехідних вод — річковий стік, контраст солоності (густини) та приземний вітер. Розраховано і проаналізовано низку розмірних й безрозмірних критеріїв та показників динаміки перехідних вод в межах та за межами ДБЛ.

У статті (Ільїн, 2023b) за даними супутникових спостережень простежено поширення аномального скиду дніпровських вод після підриву росіянами греблі Каховської ГЕС 06.06.2023, його вплив на динаміку та евтрофування шельфових вод. Ця екстремальна подія і пов'язані з нею протягом місяця поля солоності, течій і хлорофілу ПнЗЧМ ретельно відтворені за допомогою сучасної комплексної чисельної моделі (Тучковенко та ін., 2023, 2024).

У роботі (Yankovsky & Ilyin, 2024) докладно проаналізовано прецизійні експедиційні та супутникові спостереження попередніх десятиліть щодо плавучого шлейфу перехідних вод, які надходять із Дніпровсько-Бузького лиману. Поширюючись уздовж берега у напрямку Одеської затоки, шлейф може відхилитися вліво (у південному напрямку) під дією зустрічного вітру або зменшення початкового імпульсу, наданого об'ємним потоком річкових вод. Тобто, за маловітряних умов, плям може дістатися тим далі уздовж берега, чим більші витрати річкових вод на вході до гирлової області. Таке просування вочевидь повинно відтворюватися у коливаннях солоності морської води, яка реєструється щодня на морських гідрометеорологічних станціях (МГ), розташованих на узбережжі від гирла ДБЛ до Одеської затоки, а саме — МГ Очаків, оперативна група (ОГ) Південне та МГ Одеса-порт.

Стаття (Ільїн, 2024) присвячена аналізу часових рядів щодобових спостережень 1997–2010 рр. над солоністю води на вказаних пунктах північного узбережжя ПнЗЧМ на ділянці від гирла Дніпровсько-Бузького лиману (Кінбурнської протоки) до Одеської затоки. Побудовано емпіричні функції розподілу ймовірності солоності для станцій Очаків, Південне та Одеса-порт для усіх місяців і року у цілому. За допомогою метода аналізу суміші виконано одновимірну кластеризацію емпіричних гістограм солоності. Встановлено, що гістограми солоності можуть бути апроксимовані сукупністю 2–3 гаусових

функцій. Ці функції, як правило, відповідають водам річкового походження, морського походження і проміжним водам як результату взаємодії перших двох. Параметри апроксимації (середні величини, стандартне відхилення та пропорція в суміші) змінюються у просторі у залежності від відстані до джерел розпріснення або осолонення, а також у часі відповідно до сезонної мінливості процесів постачання та взаємодії водних мас на шельфі ПнЗЧМ.

Дана робота є продовженням попереднього циклу досліджень перехідних вод ПнЗЧМ у зоні впливу ДБЛ за допомогою методів статистичного аналізу часових рядів солоності, продовжених до 2020 року включно. Головною метою є докладне вивчення сезонного ходу та довготривалої мінливості солоності як показника взаємодії річкових та морських вод, а також регіональних кліматичних змін. Методи статистичного аналізу часових рядів середніх місячних величин солоності застосовано для встановлення відмінностей середніх багаторічних річних та місячних величин між двома 30-річними кліматичними періодами, розрахунку автокореляційних функцій солоності і взаємних кореляційних функцій солоності з витратами води річок. Спектральний аналіз використано для опису сезонних, міжрічних та довготривалих змін солоності ПнЗЧМ.

## ВИКОРИСТАНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА АНАЛІЗУ

У роботі використано часові ряди середніх місячних величин за даними вимірювань солоності води на МГ Очаків, ОГ Південне та МГ Одеса-порт, а також середні місячні величини витрат води за даними замикаючих створів Каховська ГЕС (р. Дніпро) та Рені (р. Дунай). Інформацію про ці ряди наведено в *табл. 1*.

Первинна інформаційна база строкових, добових, місячних і річних гідрометеорологічних величин за даними спостережень станцій морської і гирлової мережі України до 2011 року була створена Морським відділенням УкрГМІ (Ільїн та ін., 2012). Для поповнення рядів до 2020 року включно використано дані спостережень, що містяться в електронних версіях відповідних видань Державного водного кадастру (ДВК), а також таблиць морських гідрометеорологічних спостережень ТГМ-1 для станцій Одеса, Південне і Очаків.

Для оцінок стандартних статистик середніх багаторічних та місячних величин за перший та другий кліматичні періоди ВМО (1960–1990 та 1991–2020 рр.) використано дані за відповідні роки, при чому дані ОГ Південне за перший період стосуються лише 1982–1990 років (108 місяців). Повні ряди середньомісячних величин за відповідні періоди

Таблиця 1. Відомості про використані ряди середньомісячних даних спостережень

Пункт спостережень	Показник, од. вим.	Позначка	Період	Кількість
МГ Одеса-порт	Солоність води, ‰	Sods	1951–2020	796
ОГ Південне	Солоність води, ‰	Spvd	1960–2020	466
МГ Очаків	Солоність води, ‰	Soch	1982–2020	695
Каховська ГЕС (р. Дніпро)	Витрати води, м <sup>3</sup> /с	Qdnp	1951–2020	840
Рені (р. Дунай)	Витрати води, м <sup>3</sup> /с	Qdun	1951–2020	840

спостережень були піддані кореляційному і спектральному аналізу з метою визначення узгодженості та основних масштабів довготривалої мінливості солоності та річкового стоку. Аналіз цих масштабів здійснено завдяки вейвлет-перетворенню часових рядів (Torrence & Compo, 1998). Усі процедури реалізовані у вільно доступному пакеті статистичного аналізу палеоданих PAST (Hammer et al., 2001). Останню версію пакету можна отримати за посиланням <https://www.nhm.uio.no/english/research/resources/past/>.

### ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В табл. 2 представлено результати стандартного статистичного аналізу рядів середньомісячних величин солоності та витрат води, побудованих за даними вимірювань за 1960–1990 та 1991–2010 рр. на МГ Очаків, ОГ Південне, МГ Одеса-порт, а також на замикаючих створах річок Дніпро і Дунай. Ця таблиця служить для загального порівняльного

опису кліматичної мінливості індикаторів взаємодії річкових і морських вод на зазначених пунктах узбережжя та гирл головних річок ПнЗЧМ.

Перш за все слід зазначити, що залучення даних про стік р. Дунай до вивчення мінливості солоності у районі північного узбережжя ПнЗЧМ пояснюється двома причинами. По-перше, об'ємний стік Дунаю, у середньому, в 5,3 рази більше, ніж стік Дніпра, що обумовлює його вплив не тільки на усю акваторію Північно-західного шельфу, але значною мірою й на глибоководну котловину Чорного моря та його узбережжя, принаймні до протоки Босфор (Ільїн, 1999, 2006; Yankovsky, Lemeshko & Ilyin, 2004; Ільїн и др., 2012). По-друге, найбільший вплив Дунаю на північне узбережжя ПнЗЧМ і навіть ДБЛ спостерігається у літній період, коли на шельфі формується антициклонічна структура вітрових течій і води Дунаю переносяться на північний схід від його дельти (Ільїн, 2023а; Ільїн, 2023б).

Середні багаторічні витрати Дунаю в останнє 30-річчя дещо зменшилися порівняно з попереднім —

Таблиця 2. Статистичні характеристики солоності та витрат води для кліматичних періодів 1960–1990 та 1991–2020 років

Показник	1960–1990					1991–2020				
	Sods	Spvd*	Soch	Qdnp	Qdun	Sods	Spvd	Soch	Qdnp	Qdun
Кількість**	356	108	360	372	372	332	358	335	360	360
Мінімальне	7,3	8,4	1,2	250	2330	8	7,5	1,8	324	2370
Максимальне	18,2	17,6	10,2	5450	15200	18,5	17,84	10,51	3350	14100
Середнє	14,43	13,76	4,31	1276	6752	13,96	14,13	4,66	1213	6525
Стандартна похибка	0,098	0,184	0,103	37,1	137,0	0,095	0,102	0,115	31,1	129,8
Стандне відхилення	1,85	1,91	1,96	715,8	2643,0	1,73	1,94	2,11	589,3	2462,6
Коефіцієнт варіації, %	12,80	13,91	45,40	56,11	39,15	12,35	13,70	45,16	48,58	37,74
Медіана	14,7	13,85	4	1150	6205	14,19	14,5	4,3	1100	6230
Геометричне середнє	14,30	13,62	3,89	1101	6250	13,85	13,98	4,22	1081	6084
25 процентіль	13,3	12,43	2,6	724	4710	12,8	13	2,9	750	4613
75 процентіль	15,8	15,2	5,7	1650	8533	15,24	15,42	6	1608	8045

\* Примітка 1: спостереження ОГ Південне починаються з 1982 року, тож до першого кліматичного періоду відноситься лише 9 років (108 місяців). Це достатня кількість для статистичних оцінок, але до них слід ставитися обережно при порівняльному аналізі.

\*\* Примітка 2: різна кількість середніх місячних величин в рядах (крім випадку, що пояснює Примітка 1) визначається пропусками у спостереженнях солоності через різні об'єктивні й суб'єктивні причини.

на 227 м<sup>3</sup>/с, що значно перебільшує стандартну статистичну похибку оцінки (див. *табл. 2*). Також значуще зменшилися середні багаторічні витрати Дніпра — на 63 м<sup>3</sup>/с, що вдвічі більше стандартної похибки. Суттєво збільшилися мінімальні, але зменшилися максимальні величини витрат обох річок, а також зменшилися оцінки їхніх медіан та середніх геометричних.

Порівняння статистик солоності для двох кліматичних періодів має сенс лише стосовно МГ Одеса та Очаків через те, що дані ОГ Південне статистично відтворюють лише останню третину першого періоду. Маємо значуще (понад 0,4‰) зменшення середньої солоності в порту Одеса і збільшення майже на 0,4‰ солоності в Очакові. Останнє відповідає зменшенню середніх витрат Дніпра, оскільки МГ Очаків знаходиться на виході з ДБЛ і найбільшою мірою зазнає впливу річкового стоку. Водночас, зменшення солоності в Одесі вказує на зростання, у середньому, впливу адвекції трансформованих вод як Дніпра, так і Дунаю, на Одеську затоку в період 1991–2020 рр. порівняно з першим кліматичним періодом. Альтернативним поясненням є кліматичне зменшення випаровування з поверхні Чорного моря, що збільшує прісноводний бюджет і зменшує солоність поверхневих вод (Липченко і др., 2006; Ильин и др., 2012). Серед інших статистик *табл. 2* варто зазначити зменшення коефіцієнту варіації (відношення стандартного відхилення до середньої величини), що вказує на загальне зменшення мінливості річкового стоку і солоності у другий період, порівняно з першим.

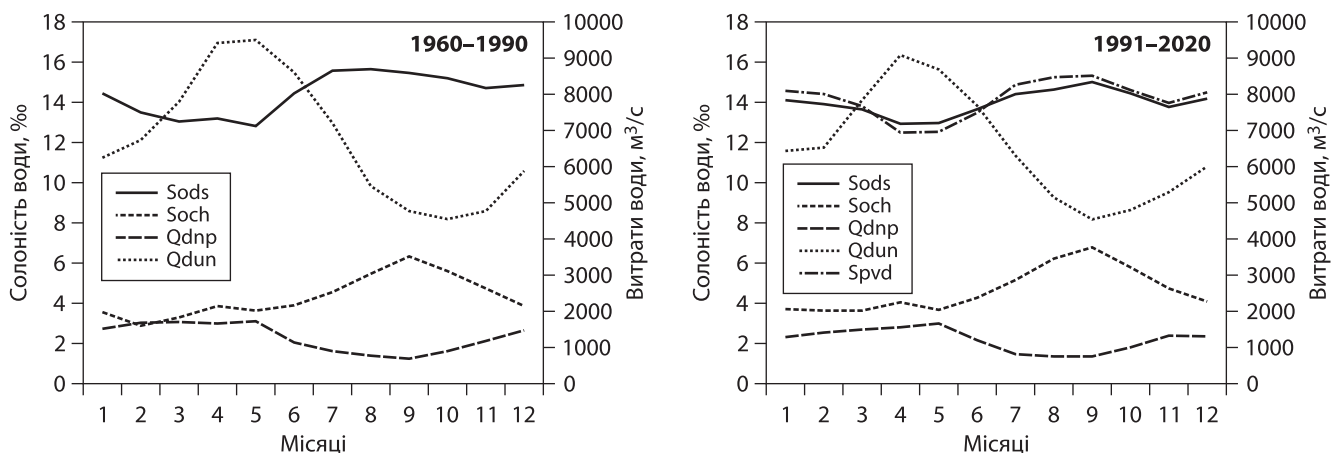
Порівняти сезонний хід солоності і стоку річок для обох періодів можна за допомогою *рис. 1*.

Крива сезонного ходу солоності у Південному представлені лише на правій панелі *рис. 1*, її можна порівняти з кривою для МГ Одеса-порт. Через

близькість обох пунктів спостережень сезонні зміни солоності води біля них подібні. Ймовірно, кліматичні зміни також будуть однакові. Трансформація сезонного ходу солоності в Одесі полягає у загальному зниженні солоності в літньо-осінній сезон та перенесенні максимуму з липня на вересень. Цьому сприяє перенесення мінімуму стоку р. Дунай з жовтня на вересень. Зменшення стоку Дунаю у весняний період і перенесення максимуму з травня на квітень не має безпосереднього впливу на сезонний хід солоності в Одесі.

Суттєвої трансформації сезонного ходу витрат Дніпра між кліматичними періодами не відбулося, але солоність у гирлі ДБЛ на МГ Очаків у вересні значно зросла (на 0,5‰). Це може означати, що зросло надходження до лиману відносно солоних морських вод із заходу під дією літнього зростання повторюваності вітрів західних румбів і відповідного збільшення адвекції води східними течіями (Ільїн, 2023а).

Взаємна статистична залежність середньомісячних величин солоності за даними трьох пунктів спостережень та їхня кореляція із середньомісячними витратами Дніпра і Дунаю ілюструється *табл. 3*. У нижньому трикутнику таблиці наведено коефіцієнти синхронної кореляції, а у верхньому — довірчі ймовірності (тобто ймовірності відсутності статистичного зв'язку). Видно, що усі коефіцієнти є значущими з ймовірністю практично 100%. Додатні коефіцієнти кореляції між усіма рядами солоності означають, що на місячних масштабах солоність коливається синхронно в усіх пунктах спостережень. Відповідно до результатів (Ільїн, 2023а, Yankovskii & Ilyin, 2024) процес поширення вод ДБЛ уздовж північного узбережжя ПнЗЧМ відбувається протягом кількох діб (порядку одного тижня) у маловітряну погоду або за сприятливого східного вітру. Також



**Рис. 1.** Сезонний хід солоності і витрат води річок, осереднений для періодів 1960–1990 (ліва панель) та 1991–2020 (права панель) років

Таблиця 3. **Кореляційна матриця середньомісячних величин солоності та витрат річок**

	Sods	Spvd	Soch	Qdnp	Qdun
Sods	1	0,000	0,000	0,000	0,000
Spvd	0,618	1	0,000	0,000	0,000
Soch	0,509	0,610	1	0,000	0,000
Qdnp	-0,609	-0,719	-0,729	1	0,000
Qdun	-0,427	-0,442	-0,378	0,411	1

кількох діб достатньо для руйнування плавучого шлейфу розпріснених вод або відтискання його на схід під дією вітрів західних румбів. Тому на місячному масштабі отримано високі від’ємні коефіцієнти кореляції витрат Дніпра з солоністю води, причому вони зменшуються з відстанню від гирла лиману: максимум — в Очакові, мінімум — в Одесі. Як вже зазначалося, вплив Дунаю на солоність північного узбережжя ПнЗЧМ виявляється лише влітку під час перебудови циркуляції вод шельфу з циклонічної на антициклонічну, тому синхронні коефіцієнти кореляції витрат води з солоністю значно менші, ніж у випадку Дніпра, хоча вони також статистично значущі.

Автокореляційні функції дозволяють встановити наявність або відсутність інерційності у часових

Таблиця 4. **Коефіцієнти автокореляції середньомісячних величин з затримкою 1 і 2 місяці**

Показник	Затримка (місяці)	
	1	2
Sods	0,576	0,358
Spvd	0,586	0,295
Soch	0,730	0,486
Qdnp	0,655	0,306
Qdun	0,743	0,434

Таблиця 5. **Коефіцієнти взаємної кореляції середньомісячних величин з затримкою 0, 1 і 2 місяці**

Показники	Затримка (місяці)		
	0	1	2
Sods-Qdnp	-0,61	-0,56	-0,31
Spvd-Qdnp	-0,72	-0,46	-0,40
Soch-Qdnp	-0,73	-0,69	-0,44
Sods-Qdun	-0,43	-0,42	-0,30
Spvd-Qdun	-0,44	-0,42	-0,23
Soch-Qdun	-0,38	-0,36	-0,30

рядах, тобто наскільки минулі значення визначають поточні. У *табл. 4* наведено значення коефіцієнтів автокореляції з затримками 1 і 2 місяці. Видно, що здебільшого величини попереднього місяця мають достатньо високу кореляцію із поточними, а з затримкою 2 місяці цей зв’язок майже вдвічі менший, хоча й зберігає знак і значущість. Це означає, що для статистичного моделювання місячних величин солоності або витрат води можна будувати моделі авторегресії першого або другого порядку.

Із *табл. 4* видно, що найбільшою інерційністю відзначаються солоність в Очакові та витрати води Дунаю.

Слід додати, що всі розраховані автокореляційні функції мають характер осциляцій із чітким періодом 1 рік, що далі буде підтверджено спектральним аналізом часових рядів.

Для кількісної характеристики статистичного зв’язку між середніми місячними величинами солоності і витрат води основних річок розраховані взаємні кореляційні функції. У *табл. 5* наведено як синхронні коефіцієнти взаємної кореляції (які співпадають з даними *табл. 3*), так і з затримкою величин солоності відносно витрат на 1 і 2 місяці.

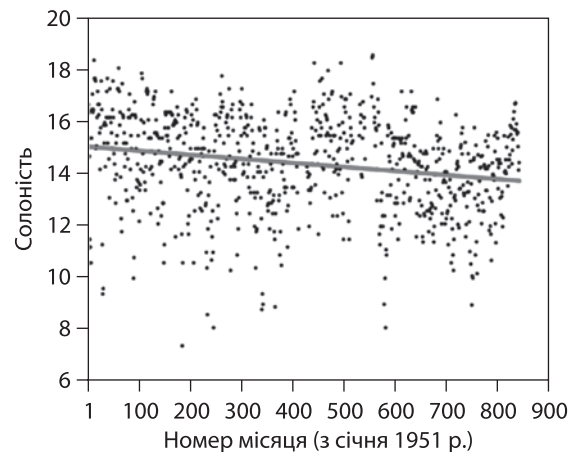
Як і слід було сподіватися, максимальні кореляції між солоністю і стоком Дніпра отримані для нульової затримки, тому що просування від гирла ДБЛ до Одеської затоки і назад, до Кінбурнської протоки, відбувається на масштабах менших, ніж місячний (впродовж днів і тижнів). Максимальний коефіцієнт кореляції спостерігається в Очакові (Кінбурнська протока, гирло ДБЛ), трохи менші — в Південному і Одесі, на відстані, відповідно  $\approx 40$  і  $60$  км від гирла лиману. Значуща кореляція зберігається і при затримках 1 і (меншою мірою) 2 місяці. Величини коефіцієнтів кореляції між солоністю і витратами Дунаю є значущими, але меншими, ніж 0,5. Причини цього обговорювалися вище. Втім, для статистичного моделювання така тіснота зв’язку може виявитися корисною.

Довготривала мінливість вивчалася на прикладі найдовшого ряду спостережень солоності МГ Одеса-порт. Першим кроком був аналіз лінійного тренду методом регресійного аналізу. На *рис. 2* чорними крапками представлено середньомісячні значення солоності з січня 1951 по грудень 2020 рр., а сірим кольором — лінійний тренд з коефіцієнтом нахилу  $-0,0016$  ‰/місяць, що відповідає нахилу  $-0,019$  ‰/рік. Тренд є значущим із ймовірністю 100% за критерієм Стьюдента. Лінія тренду перетинає вісь солоності в точці  $14,972$  ‰, що є апроксимацією середньої величини на початок часового ряду. Оцінка тренду практично співпадає із величиною  $0,020$  ‰/рік, наведеною в монографії (Ільїн

и др., 2012) за даними до 2011 року. Там же наведено оцінку тренду в Очакові за 1957–2011 роки:  $-0,016$  ‰/рік. Таким чином, за 70 років спостережень середня солоність на МГ Одеса-порт зменшилася із 14,972 до 13,658 ‰, тобто на 1,314 ‰. Тенденція була характерною за даними спостережень солоності в інших регіонах узбережжя України і пояснювалася багатолітнім трендом зменшення випаровування через послаблення вітру над морем і відповідного збільшення бюджету прісних вод Чорного моря (Липченко и др., 2006).

Наступними кроками дослідження були спектральний аналіз та вейвлет-аналіз часових рядів середніх місячних величин солоності в Одесі і середніх місячних витрат води р. Дніпро. На *рис. 3* показані результати, отримані для солоності на МГ Одеса-порт після віднімання із часового ряду лінійного тренду.

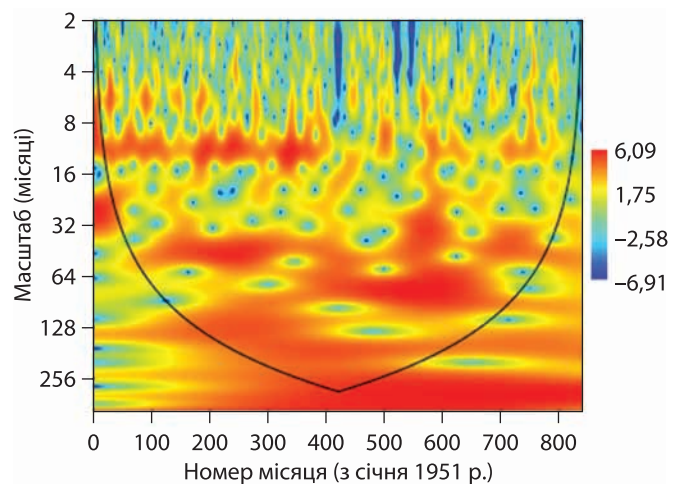
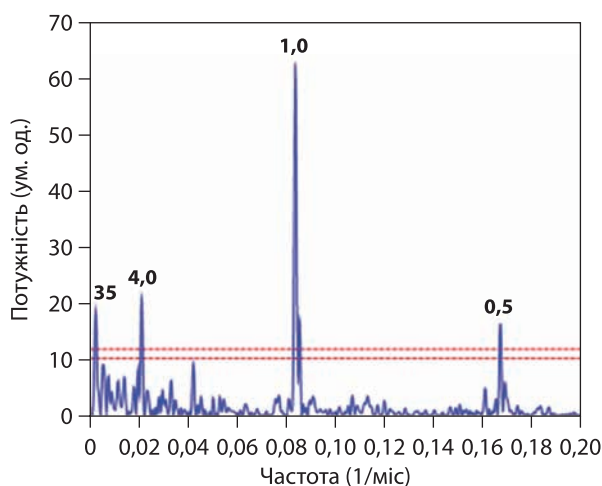
Спектр потужності коливань середньомісячної солоності (періодограма Ломба) після видалення лінійного тренду виявив 4 значущих піки, які відповідають основним періодам мінливості: піврічному (6 міс.), 1-річному (12 міс.), 4-річному (48 міс.) та 35-річному (420 міс). Якщо перші два періоди відповідають внутрішньорічній (сезонній) мінливості, то період 4 роки означає відчутну міжрічну мінливість солоності. Цей період відповідає аналогічному періоду коливань на спектрі середніх місячних витрат р. Дніпро (не показаний), де також значущими є періоди півроку, рік і 4 роки, але не виділяються довготривалі зміни з періодом 35 років. Подібним до дніпровського виглядає й спектр витрат р. Дунай. Відсутність низькочастотної моди мінливості річкового стоку може пояснюватися зарегульованістю стоку обох головних річок, що впадають до ПнЗЧМ, таким чином, що вони слабо реагують на



**Рис. 2.** Середньомісячні величини солоності води (чорні крапки) за даними МГ Одеса-порт 1951–2020 років. Сіра лінія — значущий лінійний тренд з нахилом  $-0,019$  ‰/рік

кліматичні зміни, залишаючи відчутними сезонні і міжрічні коливання.

Перевірка часових рядів у різних масштабах мінливості здійснюється за допомогою вейвлет-перетворення (Torrence & Compo, 1998). На *рис. 3* (права панель) показано вейвлет ряду середньої місячної солоності в Одесі, отриманий із застосуванням материнського вейвлету Морле (Morlet), який, як вважається, дає найкращі результати. В кольорі показана умовна потужність сигналу або, точніше, квадрат кореляції із масштабованим материнським вейвлетом. Іншими словами — внесок складових мінливості різних масштабів у залежності від часу. Наприклад, найпотужніша на спектрі річна періодичність (*рис. 3*, ліва панель), а також відповідна 6-місячна періодичність чітко проявляються на вейвлеті у першу половину періоду спостережень, тобто до 1985 року, після чого потужність (внесок



**Рис. 3.** Результати спектрального аналізу (ліва панель) та вейвлет-аналізу (права панель) ряду середніх місячних величин солоності за даними спостережень МГ Одеса-порт. Червоні лінії на лівій панелі — пороги значущості, що відповідають довірчим ймовірностям 0,05 (знизу) і 0,01 (зверху), цифри біля піків — період, роки

у загальну мінливість) річної і піврічної гармонік зазнає викривлень, що явно пов'язано зі зміною клімату, тобто розбалансуванням кліматичної системи.

Вейвлет-аналіз дозволяє виділити часовий ряд потужності заданої моди мінливості (відповідає одному горизонтальному рядку двомірного графіку вейвлету). З точки зору дослідження довготривалої мінливості цікавими є ті частоти (масштаби мінливості), які дають значущі піки у низькочастотній області спектру (рис.3, ліва панель), а саме — 0,021 1/місяць (4 роки) і 0,00238 1/місяць (35 років). Результати для цих двох мод представлені на рис. 4.

Перш за все, слід звернути увагу на зростання внеску 4-річної осциляції впродовж перших 20 років від початку часового ряду, до 1970 року, після чого потужність цієї моди швидко зменшилася до мінімуму в 1979 році. Далі відбулися ще 2 повних цикли коливань потужності 4-річної моди, до абсолютного мінімуму в 2002 році, після чого вона знов зростала до 2010 року і поступово зменшувалася до 2020 року.

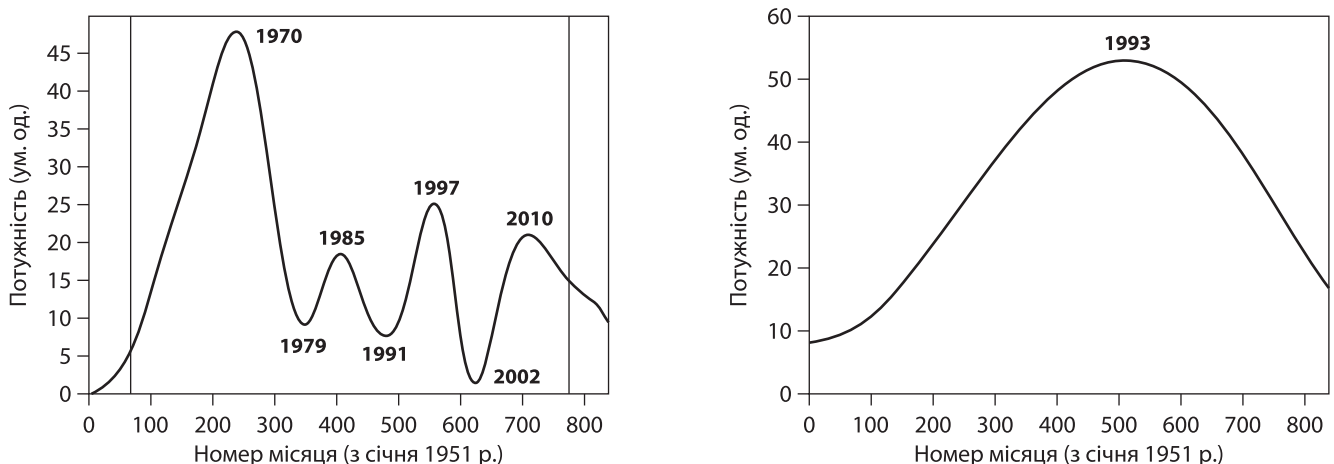
Мода довготривалої мінливості з періодом 35 років має вигляд подвійної хвилі протягом часового ряду, тобто 70 років. Маючи на увазі, що значущий лінійний тренд був видалений з ряду середньомісячної солоності перед спектральним аналізом, можна припустити, що, на фоні цього тренду зменшення солоності впродовж усього інтервалу 70 років, відбувалося "проходження" двох хвиль із періодом 35 років, максимальний вплив яких відбувся у 1993 році, після чого він зменшувався до 2020 року.

Отримана інформація потребує хоча б спроби інтерпретації (пояснення). Як відомо, провідними чинниками формування міжрічної мінливості у системі "океан-атмосфера" є явища Ель-Ніньо та

Ла-Нінья (Полонский, 2008). Ці коливання суттєво впливають на глобальну кліматичну систему. Ель-Ніньо (ЕН) асоціюється із підвищенням середньої температури та посухами в окремих регіонах, тоді як Ла-Нінья (ЛН) сприяє похолоданню та інтенсивним опадам. Стосовно Чорного моря ЕН призводить до зменшення бюджету прісних вод і, відповідно, зростанню солоності на морській поверхні, тоді як ЛН, навпаки, сприяє опрісненню регіону, у першу чергу — ПнЗЧМ. Роки екстремумів потужності (внеску) міжрічної і довготривалої мод у загальну мінливість солоності в Одесі (за винятком лінійного тренду) можна порівняти з хронологією ЕН-ЛН, створеною штучним інтелектом (ШІ) GPT-5 (рис. 5).

На рис. 4 (ліва панель) максимум 1970 року припадає між двома явищами ЕН (рис. 5), а мінімум 1979 — між попереднім ЛН 1973-1976 рр. і наступним ЕН 1982-1983 рр. Далі, знов локальний максимум потужності 4-літньої гармоніки 1985 р. припадає між ЕН 1982-1983 та 1987-1988 років. Мінімум 1991 року співпадає з початком ЕН 1991-1992 рр., який відбувся після ЛН 1988-1989 рр. Максимум 1997 року припадає на початок ЕН 1997-1998 рр., перед яким також спостерігалось ЕН 1991-1992 рр., а наступний мінімум 2002 року (абсолютний на лівому графіку рис. 4) відбувся між двома явищами Ла-Нінья! Дещо порушує цю закономірність чергування потужності міжрічних коливань солоності відповідно до чергування фаз ЕН-ЛН лише максимум 2010 року на рис. 4 зліва: він чітко співпадає з явищем Ель-Ніньо 2009-2010 років, перед яким, і одразу після якого відбувалися явища Ла-Нінья (2007-2008 та 2010-2012 роки, рис. 5).

Таким чином, зростання потужності 4-річної гармоніки міжрічних коливань солоності в порту Одеса



**Рис. 4.** Мінливість потужності міжрічних коливань солоності із періодом  $\approx 4$  роки (ліва панель) та довготривалих змін із періодом 35 років (права панель) на основі спектрального та вейвлет аналізів рис. 3. Червоні цифри — роки абсолютних і локальних екстремумів

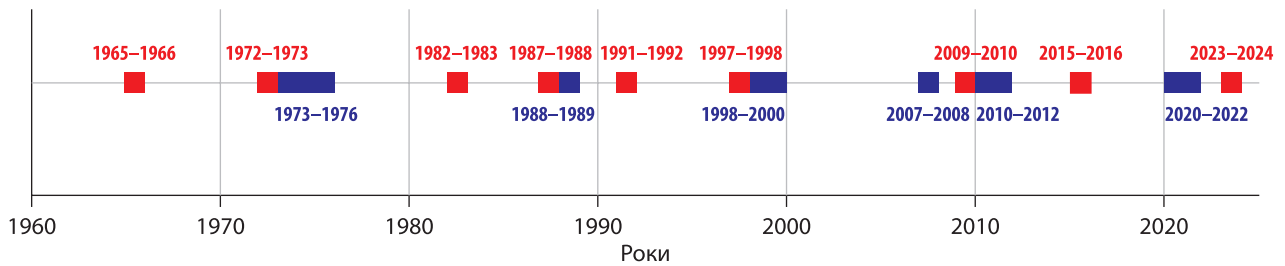


Рис. 5. Хронологія сильних Ель-Ніньо (червоний) та Ла-Нінья (синій), 1960–2025 роки (створено ШІ GPT-5)

відбувається у періоди впливу явища Ель-Ніньо, причому максимум потужності може приходиться на інтервал між сусідніми ЕН або безпосередньо на період ЕН (як у випадку 2010 року). Відповідно, зменшення цієї величини починалося після явища Ла-Нінья із мінімумом між попереднім ЛН і наступним ЕН, або між двома послідовними явищами ЛН (як у випадку 2002 року, коли потужність 4-річної гармоніки була найменшою).

За визначенням, роки Ель-Ніньо (або час між послідовними ЕН, якщо врахувати затримку у часі поширення їх впливу на відстань між екваторіальною зоною Тихого океану і Чорним морем) можуть сприяти зростанню солоності морської води через збільшення температури і зменшенню водності регіону, тобто максимуми потужності 4-річної гармоніки вказують на відповідні періоди осолонення вод поверхневого шару моря, і навпаки, після явищ Ла-Нінья відбувається зменшення потужності 4-річної гармоніки і відносно розпріснення морської поверхні.

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано часові ряди спостережень середньої місячної солоності води на станціях північного узбережжя ПнЗЧМ, на ділянці від гирла Дніпровсько-Бузького лиману (Кінбурнської протоки) до Одеської затоки. Застосовано методи стандартної описової статистики, авто- та взаємнокореляційного аналізу, лінійної регресії, спектрального та вейвлет аналізів.

2. Порівняння статистичних показників солоності для двох послідовних кліматичних періодів 1960–1990 і 1991–2020 показало значуще (понад 0,4‰) зменшення середньої солоності у порту Одеса і збільшення майже на 0,4‰ солоності в Очакові. Останнє відповідає зменшенню середніх витрат Дніпра, оскільки МГ Очаків знаходиться на виході з ДБЛ і найбільшою мірою зазнає впливу річкового стоку. Водночас, зменшення солоності в Одесі вказує на зростання, у середньому, впливу адвекції трансформованих вод як Дніпра, так і Дунаю, на Одеську затоку в період 1991–2020 рр. порівняно з першим кліматичним періодом. Ці ефекти про-

явилися на фоні загального лінійного тренду зменшення солоності у Чорному морі через кліматичне зменшення випаровування із морської поверхні.

3. Трансформація сезонного ходу солоності в Одесі у період 1991–2020 рр. порівняно із попереднім 30-річчям полягає у загальному зниженні в літньо-осінній сезон та перенесенні максимуму з липня на вересень. Цьому сприяє перенесення мінімуму стоку р. Дунай із жовтня на вересень. Зменшення стоку Дунаю у весняний період і перенесення максимуму з травня на квітень не має безпосереднього впливу на сезонний хід солоності в Одесі. Суттєвої трансформації сезонного ходу витрат Дніпра між кліматичними періодами не відбулося, але солоність у гирлі ДБЛ на МГ Очаків у вересні значно зросла (на 0,5 ‰). Це може означати, що зросло надходження до лиману відносно солоних морських вод із заходу під дією літнього зростання повторюваності вітрів західних румбів і відповідного збільшення адвекції води східними течіями.

4. Розраховано автокореляційні та взаємні кореляційні функції рядів середньомісячних величин солоності і витрат води річок. Максимальні кореляції між солоністю і стоком Дніпра отримані для нульової затримки, тому що просування від гирла ДБЛ до Одеської затоки і назад, до Кінбурнської протоки, відбувається на масштабах менших, ніж місячний (впродовж днів і тижнів). Максимальний коефіцієнт кореляції спостерігається в Очакові (Кінбурнська протока, гирло ДБЛ), трохи менші — в Південному і Одесі, на відстані, відповідно  $\approx 40$  і  $60$  км від гирла лиману. Значуща кореляція зберігається і при затримках 1 і 2 місяці, що дає підставу залучення методів векторної авторегресії для побудови статистичних моделей солоності в заданому пункті як функції попередніх значень солоності, а також поточних і попередніх величин витрат Дніпра.

5. Спектральний аналіз ряду середньої місячної солоності в Одесі (1951–2020 рр.) виявив 4 значущих піки, які відповідають основним періодам мінливості: піврічному, 1-річному, 4-річному та 35-річному. Якщо перші два періоди відповідають внутрішньорічній (сезонній) мінливості, то період 4 ро-

ки означає відчутну міжрічну мінливість солоності. Довготривалі зміни солоності з періодом 35 років на фоні лінійного тренду зменшення солоності Чорного моря пов'язані з відповідними коливаннями складових кліматичної системи — температури води і повітря, швидкості вітру над морем та, як наслідок — випаровування із морської поверхні.

6. Вейвлет-аналіз дозволив встановити, що зростання потужності 4-річної гармоніки міжрічних коливань солоності у порту Одеса відбувається в періоди впливу явища Ель-Ніньо, причому максимум потужності може приходиться на інтервал між сусідніми випадками або безпосередньо під час ЕН. Відповідно, зменшення цієї величини починалося після явища Ла-Нінья із мінімумом між попереднім ЛН і наступним ЕН, або між двома послідовними випадками Ла-Нінья.

Наступний етап досліджень — побудова статистичних моделей короткострокової та довгостро-

кової мінливості солоності для прогнозування та кліматологічних оцінок варіацій солоності у портах Одеса, Південний і Очаків під впливом основних драйверів — напрямку і швидкості вітру на масштабах кількох діб та стоку Дніпра і частково Дунаю на масштабах місяців і років. Також для моделювання естуарних систем Чорного моря і прогнозування солоності можуть бути застосовані методи машинного навчання, поєднані із фізичними моделями (Maglietta et al., 2025).

**Подяка.** Дослідження здійснено в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України в рамках виконання НДР 9/21 “Динаміка перехідних вод у системах Дністровського та Дніпровсько-Бузького лиманів за даними спостережень та математичного моделювання” (2022–2024 рр., номер державної реєстрації 0122U00 2444).

## ЛІТЕРАТУРА

- Большаков, В.С. (1970). Трансформация речных вод в Черном море. Киев: Наук. Думка. 328.
- Ильин, Ю.П. (1999). Распространение речных вод. Природные условия взморья реки Дунай и острова Змеиный. под ред. В.А. Иванова, С.В. Гошовского. Севастополь: МГИ НАНУ. 59–73.
- Ильин, Ю.П. (2006). Гидрологический режим распространения речных вод в северо-западной части Черного моря. *Наук. Праці УкрНДГМІ*, **255**. 242–251.
- Ільїн, Ю.П. (2023а). Середній стан та сезонна мінливість структури і динаміки перехідних вод Дніпровсько-Бузької гірлової області. *Український гідрометеорологічний журнал*, **32**. 63–79. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.05>.
- Ільїн, Ю.П. (2023б). Поширення екстремального виносу вод з Дніпровського лиману в Чорне море у червні 2023 року за даними супутникових спостережень. *Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля*, **2**(4). 62–74. <https://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.062>.
- Ільїн, Ю.П. (2024). Прояви взаємодії річкових і морських вод у статистичній структурі солоності за даними спостережень на берегових станціях України. *Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля*, **2**(6). 70–79. <https://doi.org/10.15407/Meteorology2024.06.072>.
- Ильин, Ю.П., Репетин, Л.Н., Белокопытов, В.Н. и др. (2012). Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 2: Черное море. Севастополь: МО УкрНИГМИ. 421 с.
- Липченко, А.Е., Ильин, Ю.П., Репетин, Л.Н., Липченко, М.М. (2006). Уменьшение испарения с поверхности Черного моря во второй половине XX столетия как следствие глобальных изменений климата. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 14. Севастополь: НПЦ Экокси-Гидрофизика. 457–471.
- Полонский, А.Б. (2008). Роль океана в изменениях климата. Киев: Наук. Думка. 183 с.
- Тучковенко, Ю.С., Кушнір, Д.В., Овчарук, В.А. та ін. (2023). Особливості розповсюдження в Чорному морі розпріснених і забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману після руйнування греблі Каховського водосховища. *Український гідрометеорологічний журнал*, **32**. 95–114. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.07>.
- Тучковенко, Ю.С., Кушнір, Д.В., Торгонський, А.В., Коморін, В.М. (2024). Вплив руйнування греблі Каховського водосховища на океанографічні умови в Північно-західній частині Чорного моря за результатами моделювання. *Український гідрометеорологічний журнал*, **33**. 66–80. <https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.05>.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, **4**(1). 9 pp.
- Maglietta, R., Verri, G., Saccotelli, L. et al. (2025). Advancing estuarine box modeling: A novel hybrid machine learning and physics-based approach. *Environmental Modelling and Software*, **183**, 106223. 14 pp. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106223>.
- Torrence, C., Compo, G.P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**. 61–78.
- Yankovsky, A.E., Ilyin, Y.P. (2024). The Dnipro-Buh plume: A tale of high-volume freshwater discharge in a non-tidal sea. *Continental Shelf Research*, **282**. 105345. 10 pp. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2024.105345>.
- Yankovsky, A.E., Lemeshko, E.M., Ilyin, Y.P. (2004). The Influence of Shelfbreak Forcing on the Alongshelf Penetration of the Danube buoyant water, Black Sea. *Continental Shelf Research*, **24**. 1083–1098. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.007>.

## REFERENCES

- Bol'shakov, V.S. (1970). Transformation of riverine waters in the Black Sea. Kiev: Naukova Dumka. [in Russian]
- Ilyin, Y.P. (1999). Expansion of the riverine water. Natural conditions of the seaside of the Danube River and the Snake Island.

- Ivanov V.A., Goshovsky S.V. (eds). Sevastopol: MHI. 5–73. [In Russian]
- Ilyin, Y.P. (2006). Hydrological regime of riverine waters expansion in the North-Western part of the Black Sea. *Scientific works of UHMI*, **255**. 242–251. [In Russian]
- Ilyin, Yu.P. (2023a). Average condition and seasonal variability of the structure and dynamics of transitional waters in the Dnieper-Bug estuary region. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, **32**. 63–79. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.05> [In Ukrainian]
- Ilyin, Yu. (2023b). Spreading of the extreme water discharge from the Dnipro-Buh estuary into the Black Sea in June 2023 by satellite observations data. *Meteorology. Hydrology. Environmental monitoring*, **2**(4). 62–74. <https://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.062>. [In Ukrainian]
- Ilyin, Yu. (2024). Manifestations of the interaction of riverine and marine waters in the statistical structure of salinity by the observations data at coastal stations of Ukraine. *Meteorology. Hydrology. Environmental monitoring*, **2**(6). 70–79. <https://doi.org/10.15407/Meteorology2024.06.072>. [In Ukrainian]
- Ilyin, Y.P., Repetin, L.N., Belokopytov, V.N. et al. (2012). Hydrometeorological conditions of the Ukrainian seas. Vol. 2: The Black Sea. Sevastopol: MB UHMI. 421. [In Russian]
- Lipchenko, A.E., Ilyin, Y.P., Repetin, L.N., Lipchenko, M.M. (2006). Reduction of evaporation from the Black Sea surface in the second half of the twentieth century as a consequence of global climate change. Environmental safety of coastal and shelf areas and integrated use of shelf resources. 14. Sevastopol: Ekosi-Gidrofizika. 457–471. [In Russian]
- Polonsky, A.B. (2008). The role of the ocean in climate change. Kiev: Naukova Dumka. 183 c. [In Russian]
- Tuchkovenko, Yu.S., Kushnir, D.V., Ovcharuk, V.A., et al. (2023). Characteristics of Black Sea dispersion of freshened and polluted transitional waters from the Dnipro-Bug estuary after destruction of the Kakhovka reservoir dam. *Ukrainian Hydro-meteorological Journal*, **32**. 95–114. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.07> [In Ukrainian]
- Tuchkovenko, Yu.S., Kushnir, D.V., Torgonskyi, A.V., Komorin, V.M. (2024). The impact of the destruction of the Kakhovka reservoir dam on the oceanographic conditions in the North-Western part of the Black Sea according to the results of modelling. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, **33**. 66–80. <https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.05>. [In Ukrainian]
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, **4**(1). 9 pp.
- Maglietta, R., Verri, G., Saccotelli, L., et al. (2025). Advancing estuarine box modeling: A novel hybrid machine learning and physics-based approach. *Environmental Modelling and Software*, **183**, 106223. 14 pp. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106223>.
- Torrence, C., Compo, G.P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**. 61–78.
- Yankovsky, A.E., Ilyin, Y.P. (2024). The Dnipro-Buh plume: A tale of high-volume freshwater discharge in a non-tidal sea. *Continental Shelf Research*, **282**. 105345. 10 pp. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2024.105345>
- Yankovsky, A.E., Lemeshko E.M., Ilyin Y.P. (2004). The Influence of Shelfbreak Forcing on the Alongshelf Penetration of the Danube buoyant water, Black Sea. *Continental Shelf Research*, **24**. 1083–1098. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.007>.

## Yuriy Ilyin

ORCID: 0000-0002-7717-6472

[ypilyin@gmail.com](mailto:ypilyin@gmail.com)

## Denys Klebanov

ORCID: 0009-0000-9227-8189

[den@uhmi.org.ua](mailto:den@uhmi.org.ua)

Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

## SEASONAL AND LONG-TERM VARIABILITY OF SALINITY IN THE AREA OF RIVERINE AND MARINE WATERS INTERACTION BASED ON OBSERVATIONS AT COASTAL STATIONS OF UKRAINE

Statistical methods were used to study the seasonal variation and long-term variability of salinity as an indicator of the interaction between riverine and marine waters on the shelf of the Northwestern part of the Black Sea. A comparison of statistical indicators for two consecutive climatic periods, 1960–1990 and 1991–2020, showed a decrease of average salinity in the port of Odessa by more than 0.4 psu and an increase of salinity in Ochakiv due to a decrease in the Dnieper River runoff by almost 0.4 psu. These effects occurred on the background of a general linear trend of decreasing salinity in the Black Sea due to a climatic decrease in evaporation from the sea surface. The transformation of the seasonal salinity cycle in Odessa during the period 1991–2020 compared to the previous 30 years consists

of a general decrease of salinity in the summer-autumn season and a shift of the maximum from July to September. Salinity in Ochakiv increased significantly in September (by 0.5 psu). Correlation analysis of the series of average monthly salinity and river water discharge values showed that the maximum correlations between salinity and Dnieper discharge were obtained for zero delay, since the movement of desalinated water from the mouth of the Dnieper to the Odessa Gulf and back takes several days, but less than a month. A significant correlation also persists at delays of 1 and 2 months, indicating strong inertia of salinity and its interaction with the Dnieper River flow. Spectral analysis of the longest series of average monthly salinity in Odessa (1951–2020) revealed four significant harmonics corresponding to the main periods of variability: semi-annual, annual, 4-year, and 35-year. The first two periods correspond to seasonal variability, and the 4-year period corresponds to interannual variability. Long-term changes in salinity with a period of 35 years are associated with corresponding fluctuations in the components of the climate system, which contribute to changes in evaporation from the sea surface. Wavelet analysis has shown that the increase in the power of the 4-year harmonic interannual salinity fluctuations in the port of Odessa occurs during periods of El Niño (EN) influence, with maximum power occurring between adjacent events or directly during EN. Accordingly, the decrease in this value began after the La Niña (LN) phenomenon, with a minimum between the previous LN and the following EN, or between two consecutive LN events.

**Keywords:** water salinity, time series, river runoff, correlation analysis, spectral analysis, wavelet, interannual variability, climate change.