МОРСЬКА ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЯ ТА ОКЕАНОГРАФІЯ

Ю.П. Ільїн
ORCID: 0000-0002-7717-6472
ypilyin@gmail.com

Український гідрометеорологічний інститут Державної служби України з надзвичайних ситуацій та НАН України, Київ

УДК 551.465+551.468.6 DOI: https://doi.org/10.15407/Meteorology2024.06.072

ПРОЯВИ ВЗАЄМОДІЇ РІЧКОВИХ І МОРСЬКИХ ВОД У СТАТИСТИЧНІЙ СТРУКТУРІ СОЛОНОСТІ ЗА ДАНИМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НА БЕРЕГОВИХ СТАНЦІЯХ УКРАЇНИ

Проаналізовано часові ряди спостережень 1997–2010 рр. за солоністю води на морських гідрометеорологічних станціях північного узбережжя Північно-західної частини Чорного моря 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 у припущенні, що вони складаються із кількох функцій нормального розподілу, кожна з яких репрезентує окрему водну масу і характеризується своїми показниками — середньою величиною, стандартним відхиленням та часткою (пропорцією) у загальному розподілі (суміші). Для пошуку оптимальних рішень застосовано метод максимальної правдоподібності та інформаційний критерій Акаіке. Експериментальним шляхом, із урахуванням особливостей динаміки вод північної частини шельфу Північно-західної частини Чорного моря, 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 надходження та взаємодії водних мас на шельфі Північно-західної частини Чорного моря. Отримані кількісні показники складових, з яких складається водна суміш біля північних берегів Північно-західної частини Чорного моря, можуть використовуватися для ймовірнісного моделювання (прогнозування) солоності води у різних пунктах як для окремих місяців, так і у цілому для року, наприклад, за допомогою методу Монте-Карло.

Ключові слова: *солоність води, часові ряди, річковий стік, нормальний розподіл, плавучий шлейф, морські течії.*

ВСТУП

Головними причинами коливань солоності біля берегів Північно-західної частини Чорного моря (ПЗЧМ) є річковий стік, адвекція поверхневих та глибинних вод відкритого моря, а також 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 (Ільїн та ін., 2012). Надходження трансформованих річкових вод на шельф ПЗЧМ є потужним чинником формування гідрологічного режиму і екологічних умов морського довкілля (Большаков, 1970; Ильин, 1999, 2006; Yankovsky, Lemeshko & Ilyin, 2004; Ільїн & Берлінський, 2022; Ільїн, 2022). Гідрологічні процеси у джерелах річкових вод — відкритих лиманах ПЗЧМ — досліджено в монографії (Тимченко, 1990), а чисельні моделі, що імітують циркуляцію та евтрофікацію вод у лиманах, докладно описано, наприклад в (Тучковенко & Тучковенко, 2018).

Нещодавній аналіз попередніх досліджень поширення і трансформації річкових вод у Чорному морі, а також застосування до цієї тематики сучасних уявлень про структуру і динаміку плавучих плюмів (шлейфів) розпріснених вод річок та естуаріїв ("перехідних вод" за термінологією Рамкової директиви по воді ЄС та Водного кодексу України)

наведено в роботі (Ільїн, 2023a) 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 та приземний вітер. Розраховано і проаналізовано низку розмірних і безрозмірних критеріїв та показників динаміки перехідних вод у 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.

У статті (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 відхилятися вліво (у південному напрямку) під дією зустрічного вітру або зменшення початкового імпульсу, наданого об'ємним потоком річкових вод. Тобто, за маловітряних умов, плюм 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.

Вплив вітру, який діє у напрямку просування розпріснених вод, прискорює цей рух і сприяє притисканню плавучого плюму до узбережжя, а складова зустрічного вітру гальмує просування, відхиляє плюм від берега і сприяє швидкому перемішуванню прісного витоку з фоновою водою на шельфі. Натомість ця шельфова вода надходить до Дніпровсько-Бузького лиману і підвищує солоність води в ньому (Ільїн, 2023a). Цей зворотній процес також має відбиватися у даних спостережень на станціях узбережжя, особливо в Очакові, який розташований у гирлі ДБЛ — Кінбурнській протоці.

Дана **робота присвячена** аналізу емпіричних функцій розподілу ймовірності (гістограм) солоності за багаторічними даними берегових станцій з метою з'ясування статистичних показників взаємодії річкових і морських вод у вказаному районі узбережжя, в умовах просторових та сезонних відмінностей окреслених динамічних процесів у прибережній смузі моря.

ВИКОРИСТАНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА АНАЛІЗУ

У роботі використано часові ряди щодобових вимірювань солоності води на МГ Очаків, ОГ Південне та МГ Одеса-порт з початку 1997 по кінець 2010 рр., які входять до інформаційної бази, створеної Морським відділенням Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України (Ільїн та ін., 2012). Цей інтервал часу (14 років) відноситься до так званого другого кліматичного періоду ВМО (1991 — 2020 рр.). Його довжина і дискретність спостережень є достатніми для опису флуктуацій солоності на синоптичному, сезонному та міжрічному (до 5-7 років) масштабах мінливості. Аналіз кліматичної мінливості на масштабах 10-100 років виходить за межі даного дослідження. Для знаходження параметрів розподілу ймовірностей солоності водних мас різного походження на кожній з трьох станцій застосовано метод **аналізу суміші (АС)**.

Аналіз суміші — це метод максимальної правдоподібності для оцінки параметрів (середнього значення, стандартного відхилення та пропорції) двох або більше одновимірних нормальних розподілів на основі об'єднаної вибірки. У даному випадку апріорі припускається, що дані кожної станції отримані з суміші вод різного походження — річкової, морської та проміжної, як продукту взаємодії перших двох. Припускається також, що солоність кожної зі складових суміші підкоряється нормальному (гаусову) закону розподілу ймовірності. Процедура АС реалізована 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/

PAST використовує процедуру (Dempster et al., 1977), яка автоматично виконується 20 разів, кожного разу з новими, випадковими початковими позиціями для середніх S_m (m = 1, 2, 3, … — номер групи). Початкові значення стандартного відхилення встановлюються як $\sigma_m = \sigma/M$, де σ — об'єднане стандартне відхилення, а M — кількість груп. Початкові значення для часток (пропорцій) встановлені як $P_m = 1/M$. "Кращі" рішення мають менші від'ємні значення логарифмічної правдоподібності. Для характеристики оптимального рішення алгоритму, який запускається кілька разів для різних значень M, використовується також інформаційний критерій Акаіке (AIC; Akaike, 1974). Мінімальне значення для AIC вказує на те, що виділено кількість груп і па-

раметри нормальних розподілів, які забезпечують найкращу апроксимацію об'єднаної гістограми без надлишкової підгонки.

Результати оцінки визначаються виглядом емпіричної функції розподілу (гістограми) солоності, який спонукає завдання кількості нормальних розподілів для апроксимації об'єднаної вибірки. Експериментальним шляхом та попереднім вивченням особливостей динаміки вод північної частини шельфу ПЗЧМ (Ильин и др., 2012; Ільїн, 2023а; Yankovsky & Ilyin, 2024) 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.

Слід зазначити, що для МГ Одеса-порт та ОГ Південне поняття "морська вода" відповідає реальному об'єкту, тобто воді, що надходить з районів відкритого моря через поверхневу адвекцію або унаслідок апвелінгу вод нижнього шару у літній сезон. Стосовно ж МГ Очаків цей термін застосовується **умовно** і означає трансформовану воду річкового походження, яка займає простір на захід від Кінбурнської протоки і має підвищену солоність після взаємодії із морською водою. Відповідно, для районів Південного і Одеси термін "річкова вода" означає трансформовану воду річкового походження, яка на шляху від ДБЛ перемішується із морською водою і значно підвищує свою солоність. Таким чином, у подальшому треба брати до уваги, що "морська" вода для Очакова може бути "річковою" водою для узбережжя Одеської області.

Значення середньої солоності суміші та стандартного відхилення за даними оцінки складових, що утворюють суміш, визначаються формулами (при $M = 3$):

$$S = P_1S_1 + P_2S_2 + P_3S_3; \quad (1)$$

$$\sigma = P_1\sigma_1 + P_2\sigma_2 + P_3\sigma_3. \quad (2)$$

По суті, метод АС є методом неієрархічної одновимірної кластеризації даних спостережень (Hammer et al., 2001).

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На *рис. 1* представлено результати аналізу суміші щодо гістограм солоності води, побудованих за усією сукупністю даних щодобових вимірювань за 1997–2010 рр. на МГ Очаків, ОГ Південне і МГ Одеса-порт. Ці гістограми описують загальнорічний розподіл ймовірностей солоності на зазначених пунктах узбережжя від гирла ДБЛ до Одеської затоки.

Червоними лініями на *рис. 1* накреслено гаусові криві розподілу окремих компонент, що складають суміш. Числові значення параметрів цих кривих для кожної станції спостережень наведено у *табл. 1–3* (останні рядки, виділені напівжирним шрифтом). Ці таблиці містять також результати оцінок методом АС для кожного місяця року за сукупністю щодобових даних інтервалу 1997–2010 років. Відсутність значень параметрів для якоїсь із груп (класів води) означає, що ця група не виділяється як окрема складова суміші за даною сукупністю інформації спостережень. Наприклад, річні оцінки для ОГ Південне (*табл. 2*) отримано лише щодо трансформованих річкових та морських вод. Це означає, що проміжна вода, як результат перемішування, не має достатньої повторюваності (поглинається крайніми складовими) у річному масштабі, хоча для усіх місяців, крім листопада, відповідна крива нормального розподілу виділяється і має помітну пропорцію. Місячні оцінки також відсутні для річкової води на початку року (січень–лютий), тому що вона у середньому ще не досягає цього району. У липні–вересні не виді-

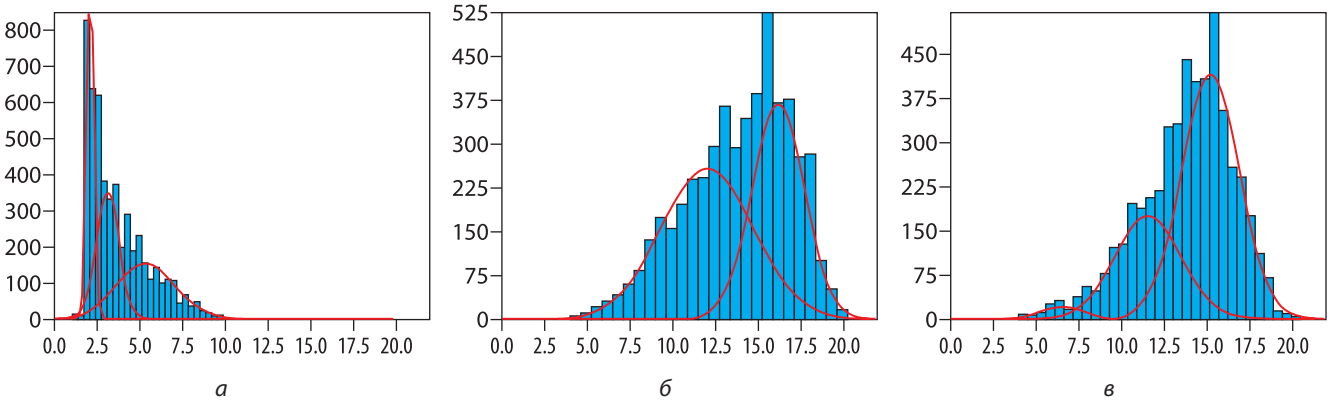

Рис. 1. Річні гістограми солоності за даними МГ Очаків (*а*), ОГ Південне (*б*) та МГ Одеса-порт (*в*). Горизонтальна вісь — солоність води (‰), вертикальна — кількість випадків (спостережень). Червоні лінії — функції нормального розподілу ймовірності, виділені методом аналізу суміші

Таблиця 1. **Щомісячні та річні величини пропорції (P_m), середніх значень (S_m) та стандартних відхилень (σ_m) нормальних розподілів солоності річкової, проміжної та морської води за даними щоденних спостережень на МГ Очаків 1997–2010 років**

Місяць	Річкова			Проміжна			Морська		
	P_1	S_1	σ_1	P_2	S_2	σ_2	P_3	S_3	σ_3
1	0,395	2,090	0,222	0,479	3,285	0,776	0,125	5,435	1,994
2	0,412	2,126	0,202	0,418	3,064	0,573	0,170	4,630	1,352
3	0,255	1,971	0,111	0,483	2,578	0,395	0,263	4,232	1,132
4	0,323	1,921	0,105	0,489	2,549	0,427	0,189	4,884	1,974
5	0,339	1,925	0,103	0,360	2,521	0,384	0,310	3,585	1,261
6	0,402	2,068	0,200	—	—	—	0,599	4,129	1,674
7	0,123	2,125	0,194	0,226	3,300	0,409	0,651	4,849	1,290
8	0,539	3,943	0,863	0,454	6,685	1,317	0,007	12,190	0,808
9	0,052	2,801	0,307	—	—	—	0,948	6,172	1,496
10	0,154	2,371	0,245	0,425	3,907	0,864	0,421	6,244	1,401
11	0,153	2,011	0,102	0,598	3,138	0,702	0,249	4,893	1,422
12	0,551	2,216	0,323	0,434	3,578	0,933	0,0157	7,695	2,229
Рік	**0,283**	**2,086**	**0,21371**	**0,340**	**3,110**	**0,674**	**0,377**	**5,339**	**1,707**

ляється окремим класом морська вода, натомість зростає солоність і ймовірність проміжної води.

Під час роботи з виділенням складових суміші виникало питання: якщо алгоритм АС виділяє лише дві кривих розподілу і це доводиться відповідними значеннями лог-правдоподібності і AIC, як інтерпретувати результати: відносити обидва розподіли до крайніх водних мас (річкової та морської) або одну з них — до проміжної, особливо якщо середні значення S_m є близькими до попередніх оцінок обох груп? Кінцеве рішення приймалося графічно-генетичним методом: на графіку внутрішньо-річних (сезонних) змін S_m усі криві повинні задовольняти умові $S_3 > S_2 > S_1$. Це зрозуміло з *рис. 2*, де показані графіки середньої солоності складових суміші вод для усіх районів спостережень.

За даними МГ Очаків проміжна вода не виділяється у червні і вересні (*табл. 1*, *рис. 2*), але попередні і наступні значення її солоності відповідають заданій умові і тому усі криві також їй відповідають. Слід також звернути увагу на значення середньої солоності "морської" води в Очакові у серпні — 12,2‰. Хоча частка цієї складової суміші менше 1%, але суттєве збільшення солоності річкової (майже

Таблиця 2. **Щомісячні та річні величини пропорції (P_m), середніх значень (S_m) та стандартних відхилень (σ_m) нормальних розподілів солоності річкової, проміжної та морської води за даними щоденних спостережень на ОГ Південне 1997–2010 років**

Місяць	Річкова			Проміжна			Морська		
	P1	S1	σ1	P2	S2	σ2	P3	S3	σ3
1	—	—	—	0,733	12,910	2,794	0,267	17,612	0,955
2	—	—	—	0,507	12,003	2,676	0,493	17,229	1,393
3	0,394	10,590	2,830	0,255	13,610	1,009	0,351	17,021	1,087
4	0,432	8,671	1,872	0,318	12,505	1,183	0,250	15,911	1,326
5	0,260	8,605	1,527	0,565	12,595	1,876	0,175	16,353	1,050
6	0,402	10,033	1,364	0,419	14,394	1,701	0,180	17,171	0,983
7	0,067	9,592	0,845	0,934	14,909	1,848	—	—	—
8	0,187	12,129	1,204	0,813	15,753	1,236	—	—	—
9	0,115	11,934	1,228	0,885	15,692	1,511	—	—	—
10	0,296	11,692	1,910	0,553	15,022	1,409	0,151	17,387	0,844
11	0,700	12,386	2,850	—	—	—	0,300	17,128	1,258
12	0,351	11,000	2,042	0,429	14,910	1,717	0,220	17,599	1,116
Рік	**0,554**	**12,027**	**2,734**	**—**	**—**	**—**	**0,447**	**16,193**	**1,548**

Таблиця 3. **Щомісячні та річні величини пропорції (P_S), середніх значень (S_m) та стандартних відхилень (σ_S) нормальних розподілів солоності річкової, проміжної та морської води за даними щоденних спостережень на МГ Одеса-порт 1997–2010 років**

Місяць	Річкова			Проміжна			Морська		
	P_1	S_1	σ_1	P_2	S_2	σ_2	P_3	S_3	σ_3
1	0,089	7,229	1,951	0,316	11,859	1,297	0,595	16,066	1,373
2	0,383	11,276	2,895	0,384	14,737	1,137	0,233	17,938	0,840
3	0,161	8,435	2,169	0,620	13,725	1,920	0,220	17,529	0,882
4	0,206	8,270	1,759	0,794	13,203	2,526	—	—	—
5	0,025	5,849	0,809	0,506	11,056	1,903	0,469	15,157	1,380
6	0,055	9,374	0,465	0,808	13,585	2,128	0,138	17,001	0,721
7	—	—	—	0,586	13,152	1,924	0,414	15,199	1,299
8	0,142	11,734	1,162	0,848	14,857	1,131	0,011	19,685	0,577
9	0,056	11,597	0,509	0,944	15,234	1,416	—	—	—
10	0,030	9,169	1,062	0,970	14,292	1,754	—	—	—
11	0,479	11,620	2,057	0,521	15,686	1,421	—	—	—
12	0,011	6,008	0,229	0,469	11,805	1,900	0,520	15,845	1,326
Рік	**0,025**	**6,534**	**1,289**	**0,317**	**11,532**	**1,949**	**0,658**	**15,204**	**1,696**

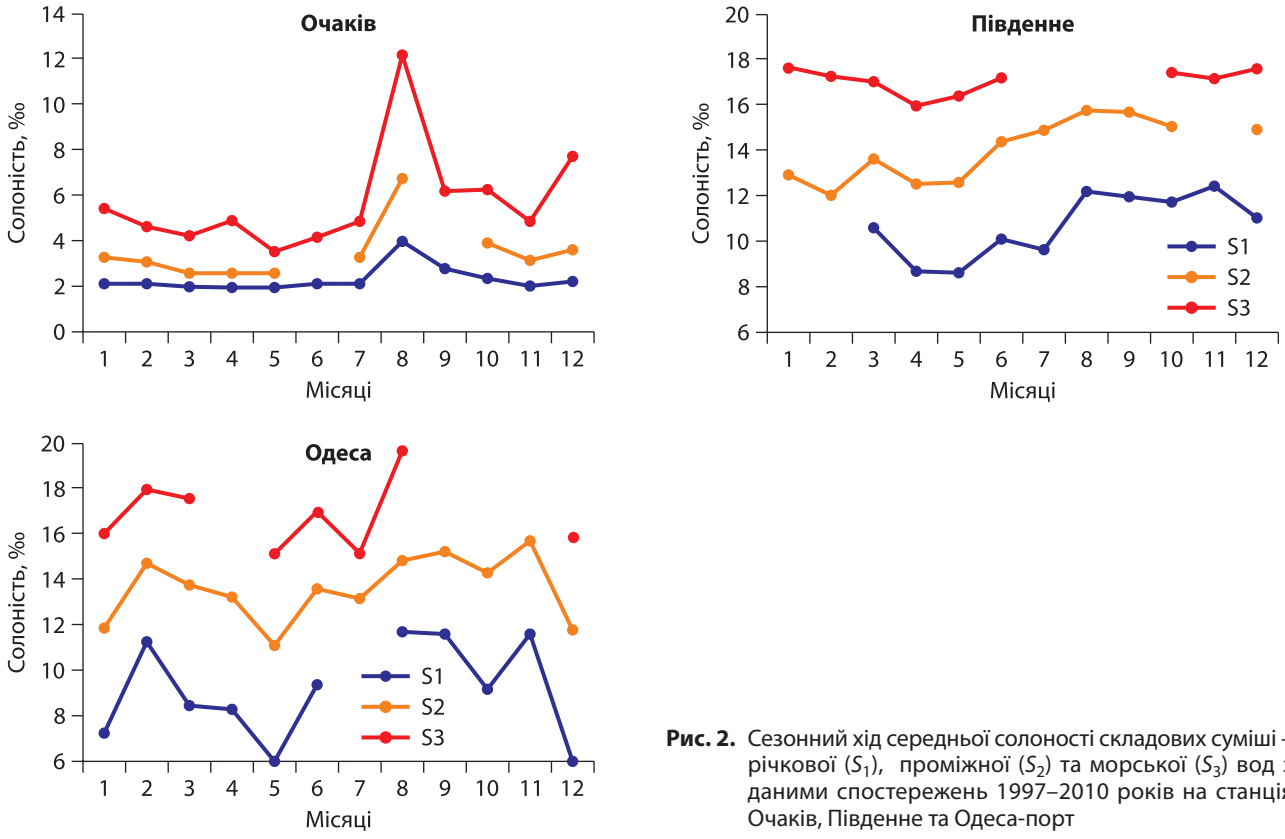

Рис. 2. Сезонний хід середньої солоності складових суміші — річкової (S_1), проміжної (S_2) та морської (S_3) вод за даними спостережень 1997–2010 років на станціях Очаків, Південне та Одеса-порт

4‰) і проміжної (6,7‰) вод доводить, що наприкінці літа відбувається зворотній рух водних мас — від моря у Дніпровсько-Бузький лиман, під впливом сезонного посилення західної складової вітру (Ільїн, 2023а). Пізніше, у вересні частка морської води зростає до 95%, а внесок річкової зменшується до 5% і проміжна вода не простежується. У жовтні пропорція "морської" води падає до 42%, що також є відчутним внеском. При цьому середня солоність зменшується до 6,2‰ за рахунок перемішування і

утворення у жовтні-грудні проміжної води. У грудні також підвищується солоність морської води до 7,7‰, вочевидь через зменшення річкового стоку, хоча її пропорція складає лише 1,6%.

На відміну від інших районів спостережень, в Одеській затоці проміжна вода виділяється протягом усього року. Найбільш розпріснена "річкова" вода з'являється у травні, підчас середнього багаторічного максимуму стоку річок Дніпро та Південний Буг (Ільїн, 2023а). Морська вода в Одесі має найбільшу солоність 19,7 ‰ у серпні (*табл. 3*, *рис. 2*). Ця величина, типова для шару основного галоклину у глибинних районах Чорного моря, вказує на адвективне постачання морської води до шельфу ПЗЧМ у придонному шарі і виходу її на поверхню біля берегів Одеси внаслідок локального апвелінгу під дією західного вітру (Ильин и др., 2012; Ільїн, 2023а). Втім, її частка у суміші лише 1,1%.

Солоність морської води в Одесі у середньому за рік та у більшості місяців нижче, ніж у Південному, хоча останній пункт спостережень знаходиться ближче до ДБЛ — головного джерела розпріснення на півночі ПЗЧМ. Вочевидь, дається взнаки близькість до Одеської затоки інших джерел річкової води — Дністровського лиману та навіть дельти р. Дунай, витоки з яких, за умов формування літньої антициклонічної системи вітрових течій на шельфі ПЗЧМ, досягають Одеси і навіть утворюють єдиний фронт трансформованих річкових вод, поєднуючись зі шлейфом ДБЛ (Большаков, 1970; Ильин, 1999, 2006).

Загалом, можна стверджувати, що результати кластеризації даних спостережень методом АС за одним показником (одновимірна класифікація) дає значно більший об'єм інформації, ніж візуальний аналіз полімодальних гістограм, застосований раніше (Ильин, 1999). За допомогою методу максимальної правдоподібності вдається виділити фізично обґрунтовані показники класів вод навіть у випадках, коли експериментальні функції розподілу є унімодальними, але їхня форма завжди дозволяє апроксимацію кількома гаусовими кривими (*рис. 1*). Параметри цих кривих (середні величини, стандартне відхилення та пропорція у суміші) змінюються у просторі у залежності від відстані до джерел розпріснення або осолонення, а також у часі відповідно до сезонної мінливості процесів надходження та взаємодії водних мас на шельфі ПЗЧМ.

Головними кількісними результатами роботи є дані *таблиць 1–3*. Їх можна використовувати з метою ймовірнісного моделювання (прогнозування) солоності води у даних пунктах як для окремих місяців, так і у цілому для року. Застосовуючи метод Монте-Карло, як в роботі (Ільїн, 2022), і задаючи параметри нормальних розподілів із *табл. 1–3*, можна оцінити показники складових суміші, а потім визначити загальну солоність та її мінливість за формулами (1), (2).

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано часові ряди спостережень 1997-2010 рр. за солоністю води на станціях північного узбережжя Північно-західної частини Чорного моря 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.

2. За допомогою метода аналізу суміші виконано одновимірну кластеризацію емпіричних гістограм солоності у припущенні, що вони складаються із кількох функцій нормального розподілу, кожна з яких репрезентує окрему водну масу і характеризується своїми показниками — середньою величиною, стандартним відхиленням та часткою (пропорцією) у загальному розподілі (суміші). Для пошуку оптимальних рішень застосовано метод максимальної правдоподібності та інформаційний критерій Акаіке.

3. Експериментальним шляхом, з урахуванням особливостей динаміки вод північної частини шельфу ПЗЧМ, 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 залежно від відстані до джерел розпріснення або осолонення, а також у часі відповідно до сезонної мінливості процесів постачання та взаємодії водних мас на шельфі ПЗЧМ.

4. Отримані кількісні показники складових, з яких складається водна суміш біля північних берегів ПЗЧМ, можуть використовуватися для ймовірнісного моделювання (прогнозування) солоності води в різних пунктах як для окремих місяців, так і у цілому для року, наприклад, за допомогою методу Монте-Карло.

Подяка. Дослідження здійснено в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України в рамках виконання НДР 3/22 "Динаміка перехідних вод у системах Дністровського та Дніпровсько-Бузького лиманів за даними спостережень та математичного моделювання" (2022–2024 рр., номер державної реєстрації 0122U002444).

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. *Наукові Праці УкрНДГМІ*, 255. 242-251.

Ільїн, Ю.П. (2022). Середні багаторічні величини та мінливість потоків води, солі та розчинених біогенних речовин в системі Дніпровсько-Бузького лиману. Метеорологія. *Гідрологія. Моніторинг довкілля*, 2. 71-80. http://doi.org/10.15407/Meteorology2022.02.071.

Ільїн, Ю.П. (2023а). Середній стан та сезонна мінливість структури і динаміки перехідних вод Дніпровсько-Бузької гирлової 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., Берлінський, М.А. (2022). Балансова модель транспорту та метаболізму розчинених форм азоту і фосфору в системі Дністровського лиману. *Український гідрометеорологічний журнал*, 29. С. 59–67. https://doi.org/10.31481/uhmj.29.2022.05.

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.

Тимченко, В.М. (1990). Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья. Киев: Наукова думка. 240 с.

Тучковенко, Ю.С., Тучковенко, О.А. (2018). Модель эвтрофикации морских и лиманных экосистем северо-западного Причерноморья. *Український гідрометеорологічний журнал*, № 21. С. 75-89. https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.08

Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19. 716–723.

Dempster, A.P., Laird N.M., Rubin D.B. (1977). Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B 39. 1–38.

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.

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. (2022). Average long-term values and variability of water, salt and dissolved nutrient flows in the system of the Dnieper-Bug estuary. *Meteorology. Hydrology. Environmental monitoring, 2*. 71–80. http://doi.org/10.15407/Meteorology 2022.02.071. [In Ukrainian]

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. [In Ukrainian]. https://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.062. [In Ukrainian]

Ilyin, Yu.P., Berlinsky, N.A. (2022). Balance model of dissolved nitrogen and phosphorus transportation and metabolism in the Dniester estuary system. *Ukrainian hydrometeorological journal, 29*. 59-67] [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]

Timchenko, V.M. (1990). Environmental and Hydrological Researches into the Water Bodies in the North-Western Black Sea Region. Kiev: Naukova Dumka. [in Russian]

Tuchkovenko, Yu.S., Tuchkovenko, O.A. (2018). The model of eutrophication of marine and estuarine ecosystems in the Northwest Black Sea region. *Ukrainian hydrometeorological journal, 21*. 75–89. [In Russian]

Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19. 716–723.

Dempster, A.P., Laird, N.M., Rubin, D.B. (1977). Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B 39. 1–38.

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.

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

Ukrainian Hydrometeorological Institute, Kyiv

MANIFESTATIONS OF THE INTERACTION OF RIVERINE AND MARINE WATERS IN THE STATISTICAL STRUCTURE OF SALINITY BY THE OBSERVATIONS DATA AT COASTAL STATIONS OF UKRAINE

Time series of water salinity observations from 1997 to 2010 at marine hydrometeorological stations on the northern coast of the Northwestern Black Sea from the mouth of the Dnipro-Buh Estuary (Kinburn Strait) to the Gulf of Odesa are analyzed. Empirical probability distribution functions of salinity were constructed for the Ochakiv, Pivdenny and Odesa-port stations for all months and year as a whole. Using the mixture analysis method, one-dimensional clustering of empirical salinity histograms is performed under the assumption that they consist of several normal distribution functions, each of which represents a separate water mass and is characterized by its own indicators — the average value, standard deviation and share (proportion) in the general distribution (mixture). To search for optimal solutions, the maximum likelihood method and the Akaike information criterion were applied. Experimentally, taking into account the peculiarities of the water dynamics in the northern part of the Northwestern Black Sea shelf, it was established that salinity histograms can be approximated by a set of 2–3 Gaussian functions. These functions, as a rule, correspond to waters of river origin, marine origin and intermediate waters as a result of the interaction of the first two. The approximation parameters (mean values, standard deviation and proportion in the mixture) vary in space depending on the distance to the source of desalination or salinization, as well as in time in accordance with the seasonal variability of the processes of supply and interaction of water masses on the North-Western Black Sea shelf. Numerical indicators of the components that make up the water mixture near the northern shores of the North-Western part of the Black Sea have been obtained. They can be used for probabilistic modeling (forecasting) of water salinity at different points both for separate months and for the whole year, for example, by means the method Monte Carlo.

Keywords: *water salinity, time series, river runoff, normal distribution, floating plume, transient water, sea currents.*