

В.О. Розлач

ORCID: 0009-0007-7051-7987
veronika.rozlach@gmail.com

Б.Ф. Христюк

ORCID: 0000-0003-4290-3745
khryst@uhmi.org.ua

Український
гідрометеорологічний
інститут Державної служби
України з надзвичайних
ситуацій та Національної
академії наук України,
Київ, Україна

УДК 556.06+556.535

КОЕФІЦІЄНТИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ У ДОВГОСТРОКОВОМУ ПРОГНОЗУВАННІ СТРОКІВ ПОЯВИ ЛЬДОВИХ ЯВИЩ НА ВОДОСХОВИЩАХ РІЧКИ ДНІПРО

Надійне та ефективне управління водними ресурсами неможливе без інформації щодо теперішнього та майбутнього стану річкових басейнів. Своєчасне інформування споживачів про майбутній розвиток гідрологічних процесів засновується на системі гідрологічних прогнозів. Велике значення має довгостроковий аналіз льодових явищ, на основі якого відбувається планування закінчення навігації та перехід функціонування господарських об'єктів на зимовий режим. Надійні та завчасні прогнози строків появи льодових явищ та встановлення льодоставу на водосховищах вкрай необхідні для раціонального використання водних ресурсів, для налагодження режимів роботи водосховищ з урахуванням вимог та інтересів різних секторів економіки: гідроенергетики, судноплавства, рибного господарства, комунального господарства тощо. Строки появи плавучого льоду відносяться до найбільш важливих характеристик осінніх льодових явищ. Останніми роками збільшилась повторюваність теплих сезонів осені та передзимового періоду, а процес льодоутворення часто має затяжний характер. У таких умовах велике значення має прогноз строків стійкої появи льоду та дат встановлення льодоставу, адже ці характеристики визначають найбільш ефективну гідрологічну стратегію в осінньо-зимовий період. У роботі досліджено зв'язки між коефіцієнтами теплового потоку та датами появи льодових явищ на водосховищах Дніпровського каскаду. Отримані прогностичні залежності виявили дуже слабкі та помірні кореляційні зв'язки, а ефективність прогностичних рівнянь склала 60% та менше. Отже, застосування коефіцієнтів теплового потоку в якості предикторів атмосферних процесів є дуже обмеженим. Саме тому слід розширити пошук предикторів атмосферних процесів для довгострокового прогнозування дат появи льодових явищ у просторі й у часі.

Ключові слова: водосховища, р. Дніпро, поява льоду, довгострокове прогнозування, прогностичні залежності, коефіцієнт теплового потоку.

ВСТУП

Поява льодових явищ та формування льоду на річках, озерах та водосховищах є важливими характеристиками льодового режиму водних об'єктів, і залежать від багатьох чинників. На терміни появи льодових явищ, насамперед, впливають метеорологічні умови — кількість сонячної радіації, теплоємність опадів, швидкість вітру, індекси атмосферної циркуляції тощо. На процес льодоутворення, окрім метеорологічних факторів, також впливає запас тепла у водоймі, швидкість течії, надходження тепла з ґрунтовими водами, скид промислових вод та ін. [13].

Особливе значення серед усієї кількості оперативних гідрологічних прогнозів, що складаються і надаються споживачам, відіграють прогнози строків настання фаз льодового режиму. Це пов'язано з тим,

що методологія їх підготовки тісно пов'язана з аналізом синоптичних процесів [2, 6]. Строки льодових явищ на озерах, річках та водосховищах залежать від масштабних атмосферних процесів, розвиток яких відбувається на значних просторах протягом тривалого часу. Саме з цієї причини довгострокові прогнози льодових явищ на водних об'єктах ґрунтуються переважно на синоптичному прогнозуванні метеорологічних умов періоду замерзання або розкриття водних об'єктів, а також на основі механічних і теплофізичних факторів між атмосферою та підстильною поверхнею [24].

Особливості в закономірностях розвитку атмосферних процесів визначають метеорологічні умови періоду льодових явищ на водних об'єктах. Однорідність атмосферних процесів на значних просторах протягом довготривалого періоду (синоптичного

сезону) та закономірності розвитку (тенденції зміни) цих процесів від сезону до сезону дають змогу з великою завчасністю визначити характер погоди на один-два місяці наперед і, як наслідок, складати довгострокові прогнози строків льодових явищ на річках, озерах та водосховищах [24]. Від точності гідрологічних прогнозів льодових явищ залежить в першу чергу й раціональність використання водних ресурсів країни.

Річка Дніпро пролягає територією України на 981 км. У природному стані русло збережене лише на 100 км, решта — зарегульовано каскадом із 6 водосховищ: Київське, Канівське, Кременчуцьке, Кам'янське, Дніпровське, Каховське. Слід зазначити, що 6 червня 2023 р. внаслідок підриву російською армією греблі ГЕС, Каховське водосховище припинило свою діяльність, проте воно все ще має велике практичне та наукове значення. Кабінетом Міністрів України погоджено відновлення даного водосховища, оскільки без нього неможливе повноцінне відновлення роботи Запорізької АЕС, також воно є останньою сходинкою Дніпровського каскаду гідроелектростанцій, що регулює стік Дніпра для живлення електроенергії, зрошення та водозабезпечення навколишніх регіонів [18]. Виробіток електроенергії на гідроелектростанціях є головною функцією Дніпровських водосховищ, тож поява льодових явищ має великий вплив на роботу гідроелектростанцій [23]. Початок льодоутворення є дуже важливою характеристикою льодового режиму річок як з теоретичної, так і з практичної точок зору, оскільки саме поява льодових явищ впливає на закінчення періоду навігації на річках, визначає терміни будівельних заходів, лімітує роботу гідроелектростанцій та інших галузей господарювання. Окрім того, аналіз коливань дат настання льодових явищ є підґрунтям прогнозних методик, їх будови та меж застосування [12, 19, 20].

Актуальність дослідження обумовлюється тим, що методик довгострокового прогнозування дат появи льодових явищ на водосховищах Дніпровського каскаду не існує. Український гідрометеорологічний центр Державної служби України з надзвичайних ситуацій має методики довгострокового прогнозування дат появи льодових явищ лише для річок [10, 11]. Один з методологічних підходів у цих методиках базується на знаходженні кореляційних зв'язків між розрахованими коефіцієнтами теплових потоків атмосферної циркуляції та датами появи льодових явищ на річках [11]. Отже, застосування такого підходу для водосховищ Дніпровського каскаду дозволить оцінити можливість розробки на його основі методик довгострокового прогнозування дат появи льодових явищ.

Огляд попередніх досліджень. Прогнози льодових характеристик мають порівняно недовгу історію, а питання розробки надійних довгострокових прогнозів льодового режиму водних об'єктів є одним з найбільш складних у гідрометеорології, яке до цього часу не отримало задовільного рішення [30]. Найперші кроки в довгострокових прогнозах льодового режиму відносяться до початку ХХ століття. Питанням утворення та скресання льодового покриву на річках, озерах, його дослідження та прогнозування присвячені роботи Arden, R.S., Wagle, T.E., Beltaos, S., Calkins, D.J., Scrimgeour, G.J., Prowse, T.D., Culp, J.M., Chambers, P.A. [26–28, 32, 34]. Складанням прогнозів скресання та замерзання річок, розробкою методів прогнозів, які базуються на залежностях строків льодових явищ від метеорологічних елементів, що характеризують атмосферні процеси, які цьому передували займалися Лебедев В.Н., Візе В.Ю., Аполлов Б.А., Бидін Ф.І. [1, 4]. Створенням методик прогнозів та складання оперативних прогнозів присвячені роботи Г.Р. Брегмана, В.В. Піотровича, Л.Г. Шуляковського, Н.Ф. Виноградова, В.І. Єгорова, Б.М. Гінзбурга [7–9, 17, 25]. Розробкою короткострокових та довгострокових льодових прогнозів на річках, озерах та водосховищах активно займався Ю.М. Георгієвський [6]. Велику увагу дослідженню льодових явищ та їх прогнозам наразі приділяють в країнах Центральної Європи, в Швеції, Китаї, США та Канаді. Так, питанням прогнозування появи льодових явищ з використанням нейронних мереж присвячені роботи Yan, Q., Ding, M. [37], Chen, S.Y., Ji, H.L. [29]. Вченими Rokaya P., Morales-Marin L., Lindenschmidt K.-E. створено систему моделювання для прогнозу скресання льоду на річці Атабаска в Канаді в реальному часі [33]. Sobolowski S. та Frei A. у своїх дослідженнях займалися знаходженням зв'язків між сніговим покривом та атмосферними телеконекційними індексами [35].

На теренах пострадянського простору були створені методики довгострокового прогнозування фаз льодового режиму для річок України, а також річки Дніпро, основою яких є залежності ключових характеристик льодового режиму від метеорологічних елементів. В Україні питаннями прогнозу льодових явищ займалися Бойко В.М., Петренко Л.В., Щербак А.В. [2].

Дослідженням льодового режиму річки Дніпро присвячені роботи Гребеня В.В., Струтинської В.М. [21], Вишневіського В.І., Шевчука С.А. [36]. Щодо прогнозування фаз льодового режиму, можна відмітити праці Лободи Н.С., Кузи А.М., Христюка Б.Ф., Горбачової Л.О., Розлач В.О. [12–13, 23]. На даний момент методик довгострокового прогнозування

фаз льодового режиму на водосховищах Дніпра в Україні все ще не існує. Відповідно, важливим є знаходження кореляційних зв'язків між показниками атмосферної циркуляції та льодовими явищами на водосховищах Дніпровського каскаду. Це дозволить створити методики довгострокового прогнозування фаз льодового режиму для водосховищ річки Дніпро.

Метою дослідження є встановлення зв'язків між кількісними показниками атмосферних процесів, які виражено через коефіцієнт теплового потоку і датами появи льодових явищ на водосховищах Дніпровського каскаду та аналіз отриманих результатів.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасні дані спостережень, без сумніву, свідчать, що клімат змінюється як на глобальному, так і на регіональному рівнях, і найбільш стрімка зміна спостерігається в останні 20–30 років. Україна, за темпами підвищення температури повітря, випереджає світові тенденції, й цей стійкий ріст відбувається у всі сезони року [3]. Середня річна температура

повітря в Україні за останніх тридцять років підвищилася на 1,2°C [16]. Середня місячна температура повітря у лютому, березні, червні, жовтні, листопаді та грудні 2019 року була найвищою або однією із найвищих для цих місяців за весь період інструментальних спостережень за погодою (з кінця XIX сторіччя).

Безпосередньо тісний зв'язок з температурним режимом та його зміною має і льодовий режим. Підвищення температури повітря призвело до більш пізніх дат появи льодових явищ на водних об'єктах України, нестійкого льодоставу, а також до труднощів у визначенні настання фаз льодового режиму [21]. Рання поява льоду та встановлення стійкого льодоставу на річках скоріш за все буде мати винятковий характер, аніж норму.

Проаналізувавши зміну температурних показників за останні 40 років та врахувавши зміну норми за минулі роки для дослідження було використано період з 2000 до 2020 року, оскільки саме з цього періоду спостерігається найбільш інтенсивна активізація процесу потепління клімату.

Зарегулювання р. Дніпро каскадом із шести водосховищ (рис. 1), побудованих впродовж XX сто-

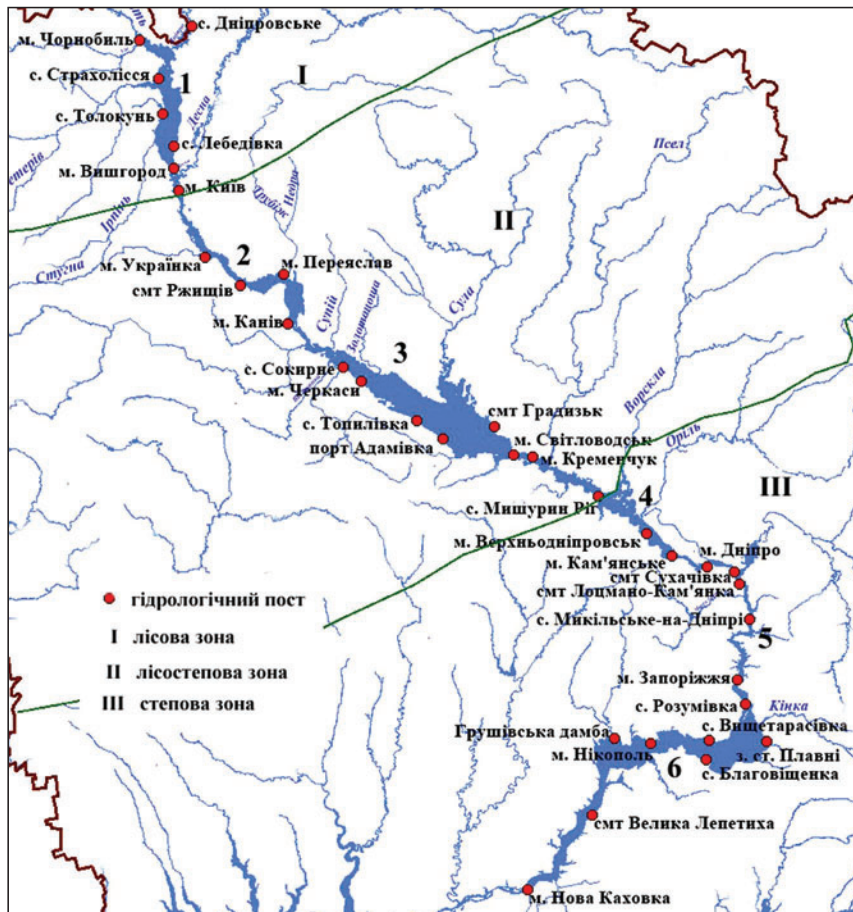


Рис. 1. Каскад Дніпровських водосховищ

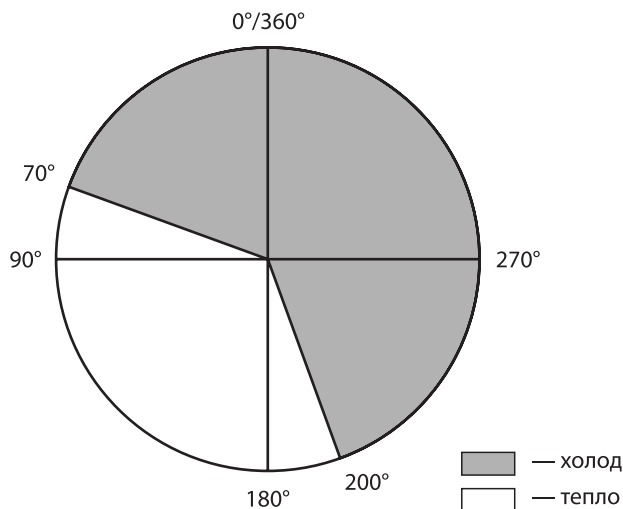


Рис. 2. Градація для визначення напрямків потоків повітря

ліття кардинально змінило льодовий режим річки у порівнянні з її природним станом [22]. Кожне з Дніпровських водосховищ має свої морфометричні особливості, які визначають умови замерзання на окремих його ділянках. Перші льодові явища на водосховищах з'являються насамперед на мілководних затоках, у гирлах річок, які впадають у водосховища, на озерних ділянках, де водні маси завдяки незначним глибинам, активному водообміну та перемішуванню охолоджуються раніше, ніж в глибоководній частині водосховищ. Систематичні спостереження за льодовим режимом водосховищ ведуться на прибережних постах, тоді як на акваторії водосховищ — епізодично (експедиційні обстеження, аеророзвідка та супутникові знімки). На водосховищах р. Дніпро до руйнування Каховського водосховища (06.06.2023 р.) діяло 38 гідрологічних постів, на яких проводились спостереження за льодовим режимом (рис. 1). Отже, у роботі для дослідження використано дати появи льодових явищ на 38 гідрологічних постах за період 2000–2020 рік включно. За дати появи льодових явищ на водосховищах Дніпровського каскаду приймалися дати їхньої першої появи у поточному зимовому періоді. Чисельне вираження дат появи льодових явищ здійснювалось шляхом визначення їх відхилень від норми.

Методологічний підхід, використаний в дослідженні, засновується на врахуванні напрямку переміщення повітряних мас та їх інтенсивності (надходження холодних та теплих повітряних мас) [5, 7, 11]. Направлення потоку повітряних мас визначається наступним методом: за нульовий напрямок рахується північний напрямок, за напрямком 90° — західний, 180° — південний напрямок, 270° — східний. Холодними впливами вважаються потоки північні, північно-західні, північно-східні, східні, а

іноді і південно-східні, з кутами від 0° до 70°, та від 200 до 360°. Теплими впливами вважаються західні, південно-західні та південні з кутами потоку більше 70° та менше 200° (рис. 2).

Підраховуючи кількість природно-синоптичних періодів з холодними (n) та теплими (m) впливами розраховують коефіцієнт теплового потоку за відношенням n/m . У роки, коли спостерігається переважання теплих потоків, коефіцієнт теплового потоку є меншим за одиницю, а в роки з переважанням холодних потоків він більший за одиницю. Визначення кількості природно-синоптичних періодів з холодними та теплими впливами, і, відповідно, розрахунок коефіцієнтів теплового потоку відбувалося за період 01 вересня – 20 жовтня, оскільки саме у цей період відбувається найбільш інтенсивне охолодження води в річках. Для аналізу атмосферних процесів використано приземні карти погоди метеорологічних показників (направлення потоків повітря на АТ–500 мб поверхні) за період з 2000 по 2020 р.

Оцінювання якості кореляційних залежностей виконано згідно з критеріями, які наведено у роботі [15].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для кожного водосховища Дніпровського каскаду було обрано один репрезентативний пост, а саме: вдсх Київське — смт Страхолисся, вдсх Канівське — м. Київ, вдсх Кременчуцьке — м. Черкаси, вдсх Кам'янське — с. Мішуричів, вдсх Дніпровське — смт Сухачівка, вдсх Каховське — с. Благовіщенка. На обраних постах щорічно поява льодових явищ на водосховищах спостерігається в першу чергу. Більш пізні строки настання льодових явищ на інших постах обумовлюються їх розташуванням біля глибоководних частин водосховища, де зосереджуються значні маси тепла; поруч гідротехнічних споруд, які порушують природний режим водосховища; в гирлових ділянках річок, які впадають до водосховища або на ділянках зі значною течією води, що перешкоджає льодоутворенню.

Для кожного року розраховані коефіцієнти теплових потоків (табл. 1), які змінюються у діапазоні від 0,11 до 1,75. Мінімальні значення теплових коефіцієнтів характерні для років, коли період, який передуює появі льодових явищ характеризується переважанням надходження теплих повітряних мас, відповідно до появи льодових явищ, що відбуваються у більш пізні строки. Так, у 2020 році коефіцієнт теплового потоку склав 0,11 (табл. 1) і на більшості постів поява льодових явищ відбулася 8–10 лютого (табл. 2). Максимальні ж позначки

коефіцієнтів теплових потоків відмічаються в роки, коли для періоду, що передує появі утворенню льодових явищ, характерним є переважання холодних повітряних мас з півночі, північного сходу та сходу. Тоді ж спостерігається поява льодових явищ у ранні строки та строки, близькі до норми. Така ситуація була у 2001, 2005 та 2008 роках (табл. 1).

Дати появи льодових явищ на водосховищах Дніпровського каскаду коливаються у широких межах та залежать від загальної циркуляції у Північній півкулі. Тому найбільш рання поява льодових явищ спостерігається в кінці жовтня – першій половині листопада під час вторгнення холодних арктичних повітряних мас на територію України, а пізня — у кінці зимового періоду (в середньому — перша декада лютого). Середня ж дата появи льодових явищ на водосховищах Дніпра припадає на другу декаду грудня (табл. 2). Різниця між пізньою та ранньою датою появи льодових явищ становить від 69 днів (вдсх Дніпровське — смт Сухачівка, вдсх Каховське — с. Благовіщенка) до 100 днів (вдсх Кам'янське — с. Мишуричів).

Встановлено залежності між датами появи льодових явищ (через показник відхилення дат появи льодових явищ від норми) та коефіцієнтами теплового потоку (n/m) для каскаду Дніпровських водосховищ (рис. 3). Аналіз залежностей показав, що коефіцієнти кореляції коливаються від 0,088 до 0,106, тобто характеризують дуже слабкі зв'язки. Потрібно відзначити, що слабкий кореляційний зв'язок ще не означає відсутність залежності між показниками [23].

Таблиця 1. Коефіцієнти теплового потоку

Рік	n/m за період 01.09–20.10	Рік	n/m за період 01.09–20.10
2000	1,20	2011	0,67
2001	1,75	2012	0,18
2002	0,22	2013	1,25
2003	0,71	2014	0,83
2004	0,57	2015	0,38
2005	1,75	2016	1,00
2006	1,20	2017	0,67
2007	0,38	2018	0,67
2008	1,75	2019	0,67
2009	0,29	2020	0,11
2010	0,29		

Отже, для з'ясування ефективності отриманих залежностей довгострокового прогнозування появи льодових явищ проведено їх оцінювання через показник ймовірності не перевищення допустимої похибки P (%) згідно [14, 15, 20]. Забезпеченість перевірних прогнозів появи льодових явищ для водосховищ Дніпра склала 45–60% (табл. 2). Отже, для практичного використання можна застосувати тільки залежність, яку отримано для гідрологічного поста вдсх Київське — смт Страхолісся.

Кліматичні зміни останніх десятиріч призвели до скорочення на річках загальної кількості днів із льодовими явищами, підвищення температури води у осінньо-зимовий період, більш пізньої появи

Таблиця 2. Статистичні характеристики рядів спостережень дати появи льодових явищ на водосховищах р. Дніпро та результати перевірних прогнозів

Водосховище — гідрологічний пост	Величина						
	Загальна кількість складених прогнозів	Середня дата появи льодових явищ	Рання дата появи льодових явищ	Пізня дата появи льодових явищ	Різниця між пізньою та ранньою датою появи льодових явищ, доба	Допустима похибка прогнозу, доба	Ймовірність не перевищення допустимої похибки, P (%)
Київське — смт Страхолісся	20	27.11	13.11.2002	28.01.2007	76	11	60
Канівське — м. Київ	20	13.12	01.12.2018	10.02.2020	71	12	45
Кременчуцьке — м. Черкаси	21	15.12	28.11.2014	08.02.2020	72	13	52
Кам'янське — с. Мишуричів	21	10.12	01.11.2000	09.02.2020	100	11	48
Дніпровське — смт Сухачівка	21	18.12	24.11.2014	01.02.2007	69	11	48
Каховське — с. Благовіщенка	20	20.12	01.12.2014	08.02.2020	69	13	45

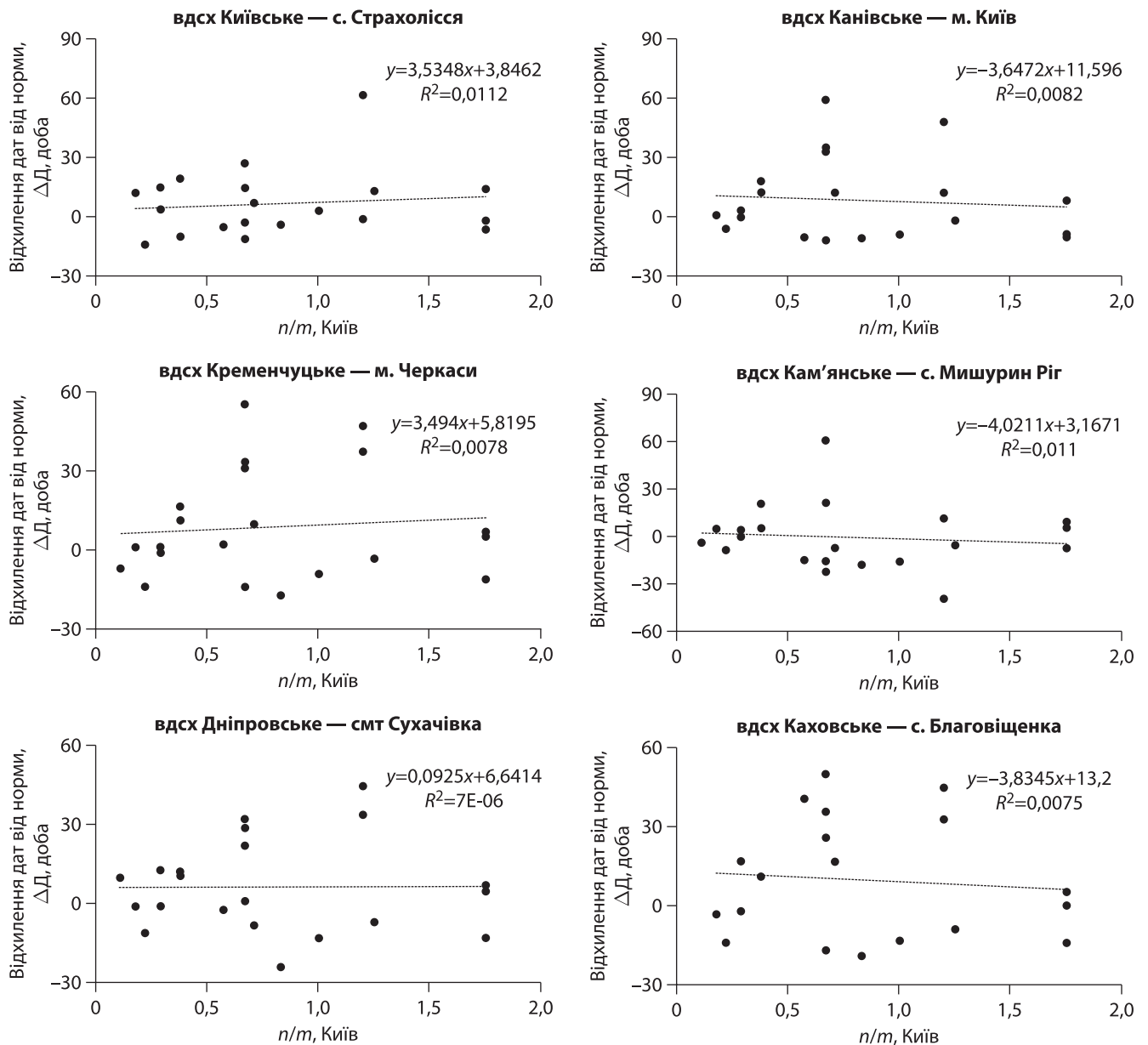


Рис. 3. Залежність дат появи льодових явищ від коефіцієнтів теплового потоку (n/m) на водосховищах Дніпровського каскаду

льодових явищ [13]. Це створює суттєві труднощі при довгостроковому прогнозуванні льодового режиму Дніпровських водосховищ. Отримані результати демонструють, що використаний у дослідженні методологічний підхід, який було розроблено для річок у другій половині ХХ століття в умовах більш стійкого режиму температури повітря не надає прийнятних результатів для водосховищ Дніпровського каскаду у сучасних кліматичних умовах. Для отримання надійних прогностичних залежностей для довгострокового прогнозування дат появи льодових явищ необхідно розширити пошук предикторів, які характеризують атмосферні процеси як у просторі, так і у часі. Таким підходом може бути використання телеконекційних показників

атмосферних процесів Земної кулі, які успішно використано у роботі [31].

ВИСНОВКИ

Строки появи льоду відносяться до найбільш важливих характеристик осінніх льодових явищ, адже визначають найбільш ефективну гідрологічну стратегію в осінньо-зимовий період. Методик довгострокового прогнозування дат появи льодових явищ на водосховищах Дніпровського каскаду не існує. Отже, знаходження кореляційних залежностей між кількісними показниками атмосферних процесів та датами появи льодових явищ на водосховищах Дніпровського каскаду, а також можливість розробки на основі такого підходу методик

довгострокового прогнозування дат появи льодових явищ є вкрай актуальним питанням. У роботі вперше досліджено зв'язки між коефіцієнтами теплового потоку та датами появи льодових явищ на водосховищах Дніпровського каскаду за сучасний період спостережень. Отримані залежності мають дуже слабкі кореляційні зв'язки, а показник ймовірності не перевищення допустимої похибки склав 60% для гідрологічного поста вдсх Київське — смт Страхолисія і менше для усіх інших постів. Отже, використати вищезазначений підхід для довгострокового прогнозування дат появи льодових явищ можна тільки для Київського водосховища, а для інших водосховищ необхідно виконати пошук нових предикторів, поправочних коефіцієнтів, або

створенні нових прогностичних методик на основі сучасних методологічних підходів. Одним із таких підходів є використання телеконнекційних показників атмосферних процесів Земної кулі для довгострокового прогнозування гідрометеорологічних характеристик. Отже, це буде наступним етапом дослідження.

Дане дослідження виконано згідно з держбюджетною темою № 5/21 "Розроблення системи довгострокового прогнозування строків настання фаз льодового режиму на водосховищах басейну р. Дніпро" Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України (№ державної реєстрації 0121U108580).

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

- Аполлов Б.А. Учение о реках. М.: Изд-во МГУ, 1963. [Apollon, V.A. (1963). *Doctrine of Rivers*. Moscow: Moscow State University].
- Бойко В.М., Петренко Л.В., Щербак А.В. Короткострокове прогнозування характеристик льодового режиму водних об'єктів України за фізико-статистичною моделлю ICE_1_5. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2014. **Т. 4 (35)**. С. 65–72. [Boyko, V.M., Petrenko, L.V., Shcherbak, A.V. (2014). Short-term forecasting of ice regime characteristics of Ukraine water objects for physico-statistical model ICE_1_5. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*. **4 (35)**. 65–72].
- Бурикiна С.І., Цуркан О.І. Тенденції сучасної зміни агрокліматичної ситуації на території степової чорноземної зони півдня України. *Таврійський науковий вісник*. **111**. 2020. С. 29–43. [Burykina, S.I., Curkan, O.I. (2020). Trends of modern changes in the agroclimatic situation in the territory of the steppe chernozem zone of southern Ukraine. *Tavriia Scientific bulletin*. **111**. 29–43].
- Быдин Ф.И. Зимний режим рек и методы его изучения. Москва, 1933. 237 с. [Bydin, F.I. (1933). *Winter regime of rivers and methods of its study*. Moscow. 237 p.].
- Вангенгейм Г.Я. Опыт применения синоптических методов к изучению и характеристике климата. Гидрометеиздат. 1985 г. [Vangengejm, G.Ia. (1985). *Experience in the application of synoptic methods to the study and characterization of climate*].
- Георгиевский Ю.М. Краткосрочные и долгосрочные прогнозы ледовых явлений на реках, озерах и водохранилищах: учеб. пособие / Ю.М. Георгиевский. Ленинград: Изд-во ЛГМИ, 1986. 50 с. [Georgievskij, Ju.M. (1986). *Short-term and long-term forecasts of ice phenomena on rivers, lakes and reservoirs*. Leningrad: LGMI. 50 p.].
- Гинзбург Б.М. Краткий обзор методов долгосрочных прогнозов вскрытия и замерзания рек. *Тр. ЦИП*. **Вып. 90**. 1959. [Ginzburg, B.M. (1959). Brief review of methods for long-term forecasts of opening and freezing of rivers. *Proc. CRI*. **90**].
- Гинзбург Б.М., Антипова Е.Г., Балашова И.В. Методика прогнозов начала ледостава на водохранилищах волжского каскада ГЭС. *Тр. ГМЦ*. 1968. **Вып. 17**. С. 3–19. [Ginzburg, B.M., Antipova, E.G., Balashova, I.V. (1968). Methodology of forecasts of the beginning of ice formation on the reservoirs of the Volga HPP cascade. *Proc. GMS*. **17**. 3–19].
- Гинзбург Б.М., Ефремова Н.Д. Речные ледовые прогнозы. Гидрометеорологическая служба Украины за 50 лет Советской власти. *Труды УкрНИГМИ*. **Вып. 81**. Л.: Гидрометеиздат. 1970. 272 с. [Ginzburg, B.M., Efremova, N.D. (1970) River ice forecasts. Hydrometeorological Service of Ukraine for 50 Years of Soviet Authority. *Proceedings of UkrNIGMI*. **81**. L.: Gidrometeoizdat. 272 p.].
- Гусева А.А. Анализ синоптических условий вскрытия и замерзания рек Украины и его применение в гидропрогностике этих явлений. Киев, 1947. [Guseva, A.A. (1947). Analysis of the synoptic conditions of the opening and freezing of the rivers of Ukraine and its application in hydroforecasting of these phenomena. Kyiv].
- Гусева А.А. Метод долгосрочного прогноза замерзания рек бассейна Верхнего и Среднего Днепра на основе анализа атмосферных процессов. Отчет. Киев, 1963. [Guseva, A.A. (1963). Method of long-term forecast of freezing of the rivers of the Upper and Middle Dnieper basin based on the analysis of atmospheric processes. Report. Kyiv].
- Куза А.М. Обґрунтування прогнозу появи льодових явищ на основі дискримінантної функції в умовах рівнинних річок України. Дис. на здоб. наук. ступ. канд. геогр. н. за спец. 11.00.07. Одеса. 2013. 287 с. [Kuza, A.M. (2013). Reasoning of the forecast of the ice phenomena appearance based on the discriminant function in the conditions of the plain rivers of Ukraine. Diss. on of Ph.D. geogr. sci. for special 11.00.07. Odesa. 287 p.].
- Лобода Н.С., Сіренко А.М. Використання методів багатовимірного статистичного аналізу у гідрологічних прогнозах льодових явищ (на прикладі річок Дністер та Тілігул). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2011. **Т. 3 (24)**. С. 58–65. [Loboda, N.S., Sirenko, A.M. (2011). The use of multidimensional statistical analysis methods in hydrological forecasts of ice phenomena (on the example of the Dniester and Tiligul rivers). *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*. **3 (24)**. 58–65].

14. Манукало В.О., Бойко В.М., Гальперіна Т.О., Петренко Л.В. До питання оцінювання якості методики та точності гідрологічних прогнозів. Науково-методичні розробки. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2016. **Вип. 268**. С. 93–98. [Manukalo, V.O., Boyko, V.M., Hal'perina, T.O., Petrenko, L.V. (2016). To the issue of quality assessment of the method and accuracy of hydrological forecasts. Scientific and methodological developments. *Scientific works UkrRHMI*. **268**. 93–98].
15. Настанова з оперативної гідрології. Прогнози режиму вод суші. Гідрологічне забезпечення і обслуговування / Керівний документ. Київ: Український гідрометеорологічний центр, 2012. 120 с. [Manual on operational hydrology. Forecasts of land water regime. Hydrological support and maintenance/Guideline document. Kyiv: Ukrainian Hydrometeorological center, 2012. 120 p.]
16. Осадчий В.І., Бабіченко В.М. Температура повітря на території України в сучасних умовах клімату. *Український географічний журнал*. 2013. **Вип. 4**. С. 32–39. [Osadchyy, V.I., Babichenko, V.M. (2013). Air temperature on the territory of Ukraine in the modern climate conditions. *Ukrainian geographical journal*. **4**. 32–39].
17. Пиотрович В. В. Методика долгосрочного прогноза сроков очищения ото льда водохранилищ Волгоградской, Волжской и Цимлянской ГЭС. *Труды ЦИП*. 1969. **Вып. 84**. 99–114. [Piotrovich, V.V. (1969). Methodology of long-term forecast of terms of ice clearing from the reservoirs of Volgograd, Volzhskaya and Tsimlyanskaya HPPs. *Proceedings of the Central Research Institute*. **84**. 99–114].
18. Постанова КМУ. Про реалізацію експериментального проекту "Будівництво Каховського гідровузла на р. Дніпро. Відбудова після руйнування Каховської ГЕС та забезпечення сталої роботи Дніпровської ГЕС у період відбудови". Кабінет міністрів України. 18.07.2023. № 730. <https://www.kmu.gov.ua/npasearch?&num=730&category=3> [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine. On the Implementation of the Pilot Project "Construction of the Kakhovka Hydroelectric Power Station on the Dnipro River. Reconstruction after the destruction of the Kakhovka HPP and ensuring the sustainable operation of the Dnipro HPP during the reconstruction period". The Cabinet of Ministers of Ukraine. 18.07.2023. № 730. <https://www.kmu.gov.ua/npasearch?&num=730&category=3>].
19. Руководство по гидрологическим прогнозам; вып. 4. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах. / под ред. Л.Г. Шуляковского. Л.: Гидрометеоиздат, 1963. 291 с. [Guidelines for Hydrological Forecasts. Forecast of ice phenomena on the rivers and reservoirs. L.G. Shulyakovsky. Vol. 4. Moscow: Gidrometizdat, 1963. 291 p.]
20. Руководство по гидрологическим прогнозам. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах. Вып. 3. Москва: Гидрометиздат, 1989. 168 с. [Guidelines for Hydrological Forecasts. Forecast of ice phenomena on the rivers and reservoirs. Vol. 3. Moscow: Gidrometizdat, 1989. 168 p.]
21. Струтинська В.М., Гребін В.В. Термічний та льодовий режим річок басейну Дніпра з другої половини ХХ століття. Київ: Ніка-Центр, 2010. С. 127–169. [Strutyńska, V.M., Grebin, V.V. (2010). Thermal and ice conditions of the Dnipro basin rivers since the second half of the 20th century. 127–169].
22. Хільчевський В.К., Гребін В.В. Великі і малі водосховища України: регіональні та басейнові особливості поширення. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. **2 (60)**. С. 6–17. [Khilchevsky, V.K., Grebin, V.V. (2021). Large and small reservoirs of Ukraine: regional and basin features of distribution. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*. **2 (60)**. 6–17].
23. Христюк Б.Ф., Горбачова Л.О., Розлач В.О. Дати появи льодових явищ на водосховищах Дніпровського каскаду та можливості їх довгострокового прогнозування. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2023. **Т. 2 (68)**. С. 22–32. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.2.3>. [Khrystiuk, B.F., Gorbachova, L.O., Rozlach, V.O. (2023). Appearance dates of ice phenomena on the Dnipro Cascade reservoirs and the possibility of their long-term forecasting. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*. **2 (68)**. 22–32].
24. Шакірзанова Ж.Р. Довгострокові гідрологічні прогнози: Конспект лекцій. Одеса: Вид-во: ОДЕКУ, 2010. 153 с. [Shakirzanova, J.R. (2010). Long-term hydrological forecasts: Synopsis of lectures. Odesa. ODEKU. 153 p.]
25. Шуляковский Л.Г. Появление льда и начало ледостава на реках, озерах и водохранилищах. Расчеты для целей прогноза. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 216 с. [Shulyakovsky, L.G. (1960). Ice appearance and the beginning of ice formation on rivers, lakes and reservoirs. Calculations for forecasting purposes. L.: Gidrometeoizdat. 216 p.]
26. Arden, R.S., Wagle, T.E. (1972). Dynamics of ice formation in the upper Niagara River. Proc., Int. Symp. On the Role of Snow and Ice in Hydrology; Symp. On Measurement and Forecasting. WMO-4: Measurement and forecasting specific to river and lake ice, UNESCO/WMO/IAHS, Banff, Canada, 2. 1296–1313.
27. Beltaos, S., et al. (1993). Chapter 2: Physical effects of river ice." Environmental aspects of river ice, T.D. Prowse and N.C. Gridley, eds., Envir. Canada, National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Canada. 3–74.
28. Calkins, D.J. (1993). Section 2.2: Physical effects of river ice." Environmental aspects of river ice, T.D. Prowse and N.C. Gridley, eds., Envir. Canada, National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Canada.
29. Chen, S.Y., Ji, H.L. (2004). Fuzzy Optimization Neural Network BP Approach for Ice Forecasting. Shuili Xuebao (6). 114–118.
30. Guide to hydrological practices. Volume II: Management of water resources and application of hydrological practices. WMO. No. 168. 6th ed. Geneva: World Meteorological Organization, 2009. 324 p.
31. Khrystiuk, B.F., Gorbachova, L.O. (2022). Application of the Natl Index for Long-Term Forecasting of Freeze-Up Appearance Date at the Kyiv Reservoir. Proceedings of the XVI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment". Kyiv, Ukraine, November 15–18, 2022. European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE). **2022**. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580071>.
32. Prowse, T.D. (2001). River-ice ecology. I: Hydrologic, geomorphic, and water-quality aspects. *Journal of Cold Regions Engineering*. **15**. Issue. 1. 1–16. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(2001\)15:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(2001)15:1(1)).
33. Rokaya, P., Morales-Marin, L., Lindenschmidt, K.-E. (2020). A physically-based modelling framework for operational forecasting of river ice breakup. *Advances in water resources*. **139**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103554>.
34. Scrimgeour, G.J., Prowse, T.D., Culp, J.M., Chambers, P.A. (1994). Ecological effects of river ice break-up: a review and perspective. *Freshwater Biology*. **32**. 261–275.
35. Sobolowski, S., Frei, A. (2007). Lagged relationships between North American snow mass and atmospheric teleconnection indices. *International Journal of Climatology*. **27 (2)**. 221–231. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1395>.

36. Vyshnevskiy, V.I., Shevchuk, S.A. (2020). Use of remote sensing data to study ice cover in the Dnipro Reservoirs. *Journal of Geology, Geography, and Geoecology*. **29 (1)**. 206–216. DOI: <https://doi.org/10.15421/112019>.
37. Yan, Q., Ding, M. (2011). Using Dynamic Fuzzy Neural Networks Approach to Predict Ice Formation. In Proceedings

of the 2011 MSEC International Conference on Multimedia, Software Engineering and Computing, Wuhan, China, 26–27 November 2011; *Advances in Multimedia, Software Engineering and Computing* Vol. 1. Jin, D., Lin, S., Eds. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. **128**.

Rozlach Veronika

ORCID: 0009-0007-7051-7987
veronika.rozlach@gmail.com

Khrystiuk Borys

ORCID: 0000-0003-4290-3745
khryst@uhmi.org.ua

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

HEAT FLOW COEFFICIENTS AT THE LONG-TERM FORECASTING OF THE ICE PHENOMENA APPEARANCE DATES AT THE DNIPRO CASCADE RESERVOIRS

Reliable and efficient water management is impossible without information on the current and future condition of river basins. Timely informing stakeholders about the future development of hydrological processes is based on a system of hydrological forecasts. Long-term forecasts of ice phenomena are of great importance, as they are used to plan the end of navigation and the crossing of economic facilities to winter regime. Reliable

and lead-time forecasts of appearance dates of ice phenomena and freeze-up on reservoirs are essential for the rational use of water resources and for establishing reservoir operation regimes that take into account the requirements and interests of various economic sectors: hydropower, shipping, fisheries, utilities, etc. The appearance dates of floating ice are one of the most important characteristics of autumn ice phenomena. In recent years, the frequency of warm seasons in autumn and pre-winter has increased, and the process of ice formation is often protracted. In such conditions, it is of great importance to forecast the appearance dates of stable ice and the dates of freeze-up, as these characteristics determine the most effective hydrological strategy in the autumn-winter period. The paper investigates the relationship between heat flow coefficients and the appearance dates of ice phenomena in the reservoirs of the Dnipro cascade. The received forecasting dependencies revealed very weak and moderate correlations, and the efficiency of the forecasting equations was 60% or less. Thus, the use of heat flow coefficients as predictors of atmospheric processes is very limited. That is why the search for predictors of atmospheric processes should be expanded for long-term forecasting of the appearance dates of ice phenomena in space and time.

Keywords: reservoirs, Dnipro River, appearance of ice, long-term forecasting, prognostic dependencies, heat flow coefficient.

