

# Методики довгострокового прогнозування строків руйнування льодоставу та очищення від льоду водосховищ Дніпровського каскаду за телеконнекційними показниками

**Б. Христюк, Л. Горбачова, 2023**

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України  
та НАН України, Київ, Україна  
Надійшла 11 серпня 2023 р.

Довгострокове прогнозування льодового режиму водосховищ Дніпровського каскаду є дуже важливим насамперед для роботи гідроелектростанцій. Крім того, такі прогнози необхідні для забезпечення роботи й інших галузей господарства, а саме судноплавства, рибного, комунального господарств тощо. На теперішній час відділ гідрологічних прогнозів Українського гідрометеорологічного центру для складання довгострокових прогнозів і консультацій характеристик льодового режиму водних об'єктів України використовує методичні підходи середини та другої половини ХХ ст., які розроблено тільки для річок. Зрозуміло, що методики для прогнозування льодового режиму водосховищ потребують розроблення.

Мета статті роботи — розроблення методик довгострокового прогнозування строків руйнування льодоставу і очищення від льоду водосховищ Дніпровського каскаду з використанням телеконнекційних показників. Дослідження виконано за даними спостережень 35 гідрологічних постів, які розташовані на 6 водосховищах Дніпровського каскаду, зокрема для зруйнованого Каховського водосховища. Використано дати руйнування льодоставу і очищення від льоду за період від початку спостережень на кожному гідрологічному посту до 2020 р. включно. Використано також відомості про телеконнекційні показники, а саме 34 атмосферних індексів, індексів температури морської поверхні, телеконнекційних індексів і патернів, які визначає Національна служба погоди Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США.

Розроблено методики довгострокового прогнозування строків руйнування льодоставу і очищення від льоду водосховищ Дніпровського каскаду шляхом пошуку найкращого кореляційного або регресійного зв'язку між датами і телеконнекційними показниками. Забезпеченість допустимих похибок розроблених методик становить 62—71 %, що відповідає оцінкам якості методик «задовільно» і дає можливість рекомендувати їх для використання в оперативному прогнозуванні.

**Ключові слова:** льодові явища, льодостав, Дніпровські водосховища, телеконнекційні індекси, прогнозні залежності.

---

Citation: *Khrystiuk, B., & Gorbachova, L. (2023). Long-term forecasting methods of dates of ice break-up and disappearance at the Dnipro Cascade Reservoirs by teleconnection indicators. Geofizicheskiy Zhurnal, 45(6), 87—101. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i6.293309>.*

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

**Вступ.** Довгострокове прогнозування льодового режиму водосховищ Дніпровського каскаду дуже важливе, насамперед для роботи гідроелектростанцій. Такі прогнози потрібні й для забезпечення роботи інших галузей, а саме судноплавства, рибного, комунального господарств тощо [Сусідко та ін., 2007; Gozini et al., 2023]. Довгострокові прогнози строків руйнування льодоставу та очищення від льоду потрібні для визначення строків, глибини весняного спрацювання водосховищ і режиму безпечного пропуску весняного льодоходу через Дніпровський каскад. Актуальність такого прогнозування підвищується через знищення Каховського водосховища російськими окупантами, які вночі 6 червня 2023 р. підірвали Каховську ГЕС [Hubareva, 2023]. Дніпровський каскад — це єдиний водогосподарський комплекс, у якому функціонування кожного з шести водосховищ узгоджено і залежить один від одного. Загалом будівництво каскаду тривало майже 50 років, а саме з кінця 1920-х до середини 1970-х років. За той час було побудовано шість водосховищ: Дніпровське (1932 р.), Каховське (1956 р.), Кременчуцьке (1961 р.), Кам'янське (1964 р.), Київське (1966 р.), Канівське (1976 р.) [Хільчевський, Гребінь, 2021]. Завдяки дніпровським водосховищам вирішуються такі завдання: отримання екологічно чистої електроенергії, водопостачання населених пунктів, промисловості та сільського господарства; розвиток судноплавства і рибного господарств, а також захист долини р. Дніпро від катастрофічних повеней [Вишневський та ін., 2011]. Зрозуміло, що знищення Каховського водосховища значно утруднює роботу інших п'яти водосховищ, особливо у весняний період, коли спостерігаються руйнування льодоставу, весняний льодохід, очищення від льоду, підвищення рівнів води у водосховищах і визначаються об'єми спрацювання кожного з водосховищ. Кабінет Міністрів України прийняв рішення щодо відбудови Каховської ГЕС та наповнення Каховського водосховища з метою забезпечення надійної експлуатації водозабору Запорізької АЕС, а також

інших водозаборів комунального та промислового водопостачання і забезпечення сталої роботи енергосистеми України [Постанова..., 2023]. Зрозуміло, що довгострокові прогнози руйнування і очищення від льоду водосховищ Дніпровського каскаду також робитимуть певний внесок у реалізацію зазначених вище завдань. Разом з тим методик довгострокового прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду не існує, отже, потрібні розробки таких методик. Науково-методична база, яку донині використовує Український гідрометеорологічний центр (УкрГМЦ) для складання довгострокових прогнозів і консультацій характеристик льодового режиму водних об'єктів України, розроблена ще у середині ХХ ст. і тільки для річок України [Гусева, 1947].

Розроблення надійних довгострокових прогнозів льодового режиму водних об'єктів є досить складним науковим завданням, яке як у світі, так і в Україні ще не має остаточних рішень [WMO ..., 2009; Rokaya et al., 2020]. У довгостроковому прогнозуванні характеристик льодового режиму водних об'єктів застосовуються загальноприйняті методи досліджень, а саме статистичний, дискримінантний, кореляційний, регресійний аналізи, ортогональні функції [WMO ..., 2009; Настанова..., 2012]. За допомогою цих методів вирішується головна проблема — пошук оптимальних предикторів атмосферних процесів, під дією яких і формується льодовий режим водних об'єктів. Зазвичай такий пошук здійснюється за двома підходами. За першим шукають зв'язок між атмосферними процесами, які характеризуються певними кількісними показниками та датами настання льодових явищ. За другим підходам атмосферні процеси розглядають через мінімальну кількість параметрів, які охоплюють метеорологічні поля на великих площах і є визначальними для формування льодового режиму водних об'єктів. Такі параметри отримують шляхом розкладення метеорологічних полів (баричних, температурних) за допомогою

природних ортогональних складових, поліномів Чебишева, рядів Фур'є, тощо [Попов, 1979; WMO ..., 2009]. У сучасних дослідженнях для прогнозування льодових явищ на водних об'єктах використовують методи дистанційного супутникового зондування [Gauthier et al., 2008; Cook, Bradley, 2010; Brown, Duguay, 2012], методи машинного навчання [Guo et al., 2018; Madaeni et al., 2020], телеконнекційні показники [Bonsal et al., 2006; Ghanbari et al., 2009; Ptak et al., 2019; Khrystiuk, Gorbachova, 2023].

Телеконнекційні показники (індекси, патерни) широко використовують у гідрокліматичному прогнозуванні, це дає змогу створювати прогнози із завчасністю від тижнів до місяців [Van den Dool, 2007; Chen, Lee, 2017]. Вплив великомасштабної циркуляції над Тихим и Атлантичним океанами на формування і характеристики льодового режиму річок і озер переконливо показано у дослідженнях [Bonsal et al., 2006; Ghanbari et al., 2009; Schmidt et al., 2019] для Північної Америки, [Шимараєв, 2007; Сутырина, 2017] для Росії, [Girjato-wicz et al., 2003; Soja et al., 2014; Sanchez-Lopez et al., 2015; Ptak et al., 2019] для Європи. В Україні телеконнекційні показники використано у публікації [Лобода, Сіренко, 2010] для короткострокового прогнозування появи льодових явищ на р. Дністер, а також у статтях [Khrystiuk, Gorbachova, 2022, 2023] для довгострокового прогнозування появи льодових явищ і встановлення льодоставу на водосховищах Дніпровського каскаду.

Мета роботи — використання телеконнекційних показників для розроблення методик довгострокового прогнозування строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду.

**Матеріали та методи дослідження.** Річка Дніпро у межах України і, відповідно, водосховища, які побудовані в її руслі, розміщуються у трьох фізико-географічних зонах: лісовій (Київське водосховище), лісостеповій (Канівське та частково Кременчуцьке водосховища) і степовій (частково Кременчуцьке, Кам'янське, Дніпровське

та Каховське водосховища) (рис. 1). Таке розташування впливає на умови формування і строки настання основних фаз льодового режиму на водосховищах, які підпорядковуються географічній зональності. Навесні перші прояви руйнування льодового покриву на водосховищах відбуваються на мілководних ділянках та у гирлах річок, які впадають у водосховища. На таких ділянках унаслідок невеликих глибин та інтенсивного водообміну водні маси прогріваються швидше, ніж у глибоководних частинах водосховищ, що і приводить до перших зсувів льоду, а пізніше до його руйнування і очищення від нього [Vyshnevskiy, Shevchuk, 2020].

В окремі роки, залежно від гідрометеорологічної ситуації, на водосховищах можуть відбуватися механічні руйнування льодового покриву. Певною мірою природний режим льодоставу в межах міст можуть порушувати скиди теплої води від різноманітних підприємств [Вишневський, 2009]. Зрозуміло, що порушення природного льодового режиму на водосховищах значно утруднює його довгострокове прогнозування.

У статті для дослідження використано дані спостережень за льодовим режимом водосховищ Дніпровського каскаду, що містяться в опублікованих довідкових матеріалах, підготовлених Центральною геофізичною обсерваторією імені Бориса Срезневського (м. Київ). Дослідження виконано для 35 гідрологічних постів за період, початок якого обрано роздільно індивідуально для кожного водосховища (табл. 2) і по 2020 р. включно (див. рис. 1). За дату руйнування льодоставу брали дату початку його природного руйнування, тобто його танення, а за дату очищення від льодових явищ — дату після останнього дня з льодовими явищами або льодоставом, тобто дату першого дня «чистої води».

Як кількісні показники атмосферних процесів, під впливом яких руйнується льодостав і очищуються від льоду водосховища Дніпровського каскаду, використано телеконнекційні показники, а саме атмосферні індекси, індекси температури морської

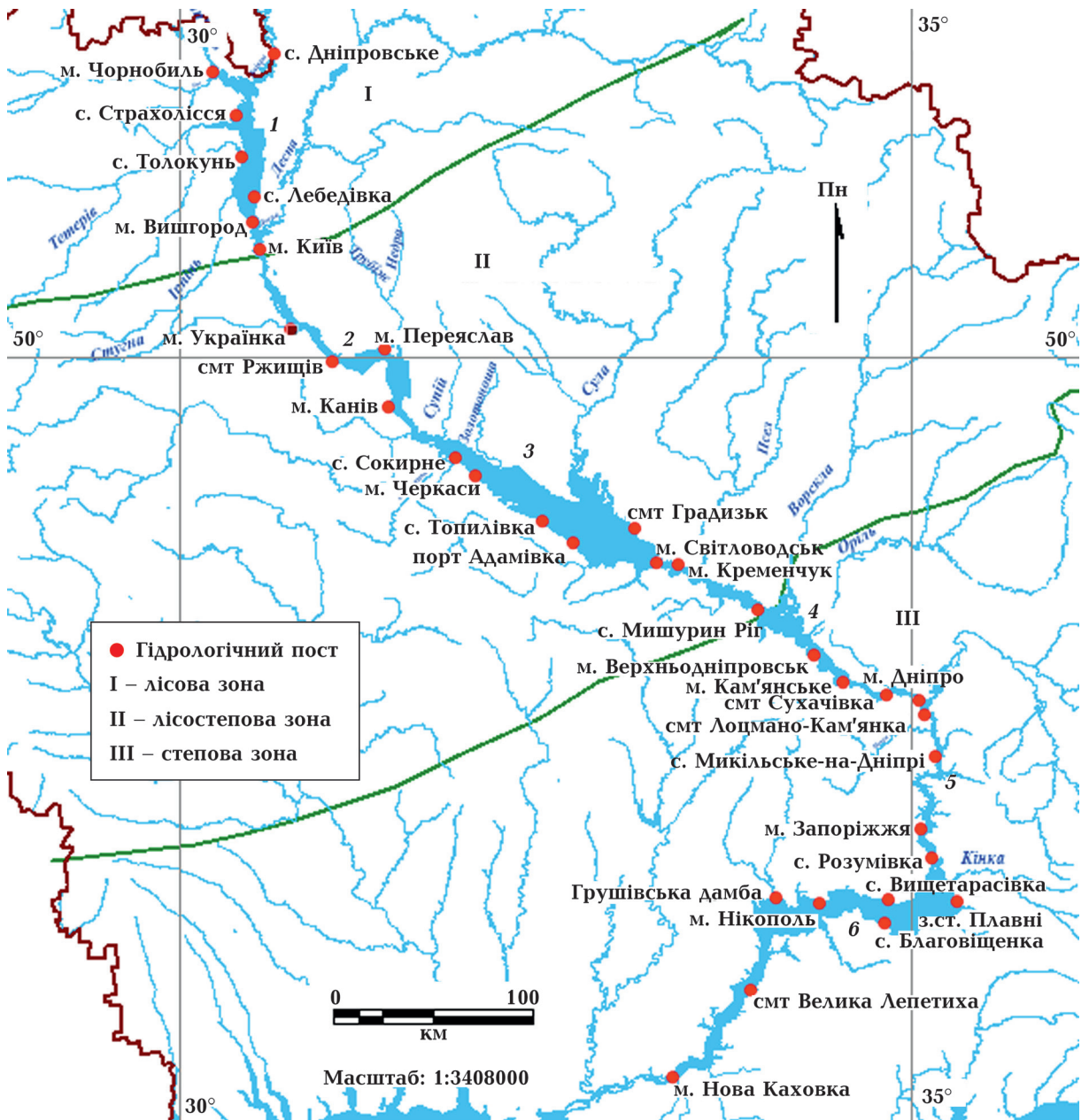


Рис. 1. Розташування водосховищ Дніпровського каскаду і гідрологічних постів на них: 1 — вдсх Київське, 2 — вдсх Канівське, 3 — вдсх Кременчуцьке, 4 — вдсх Кам'янське, 5 — вдсх Дніпровське, 6 — вдсх Каховське; наведено у межах до 06.06.2023. Фонова графіка — від Інституту географії НАН України.

Fig. 1. Location the Dnipro Cascade reservoirs and water gauges on them (1 — Kyiv reservoir, 2 — Kaniv reservoir, 3 — Kremenchuk reservoir, 4 — Kamianske reservoir, 5 — Dnipro reservoir, 6 — Kakhov reservoir is shown until 06.06.2023) (background graphic from Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine).

поверхні, телеконнекційні індекси та патерни. Всі ці показники визначає Національна служба погоди (National Weather Service, NWS) Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США (National Oceanic & Atmospheric

Administration USA, NOAA). Для Тихоокеанського регіону і, частково, Атлантики визначаються атмосферні індекси та індекси температури морської поверхні. Для різних ділянок земної кулі обраховуються телеконнекційні індекси та патерни. Середні

місячні значення всіх телеконекційних показників наведено на сайті: [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/MD\\_index.php](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/MD_index.php). Для дослідження використано стандартизовані значення 34 індексів і патернів.

Методики довгострокового прогнозування розроблені шляхом пошуку найкращого кореляційного або регресійного зв'язку між датами руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду та телеконекційними показниками NWS NOAA USA. Пошук таких зв'язків виконували для одного гідрологічного поста-індикатора на кожному водосховищі. Такий пост обирали з поміж інших постів за найкращим зв'язком між датами руйнування льодоставу і очищенням від льоду та значеннями телеконекційних показників.

Для всіх інших гідрологічних постів прогнозні дати руйнування льодоставу і очищення від льоду визначаються за кореляційними залежностями між датами на цих постах і датами на посту-індикаторі на кожному із шести водосховищ.

Оцінювання якості розроблених методик довгострокового прогнозування строків появи льодових явищ і встановлення льодоставу на водосховищах Дніпровського каскаду виконано за залежними даними згідно з критеріями, наведеними у табл. 1 [Настанова ..., 2012].

Середнє квадратичне відхилення прогнозованої величини ( $\bar{\sigma}$ ) та середня квадратична похибка перевірочних прогнозів ( $\bar{S}$ ) визначали за формулами

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\left(\sum_1^n \Delta D_i^2\right) / (n-1)}, \quad (1)$$

$$\bar{S} = \sqrt{\left(\sum_1^n (D - D')^2\right) / n}, \quad (2)$$

де  $\Delta D_i$  — відхилення дат руйнування льодо-

ставу/очищення від льоду ( $D_i$ ) від середньої дати за багаторічний період спостережень ( $\bar{D}$ );  $n$  — кількість членів ряду;  $D$  — дата спостережень;  $D'$  — прогнозна дата.

Допустиму похибку прогнозу визначали за виразом

$$\delta_{\text{доп}} = \pm 0,674 \bar{\sigma}. \quad (3)$$

### Результати досліджень та їх аналіз.

Для кожного водосховища Дніпровського каскаду визначено гідрологічні пости-індикатори, для яких було знайдено найкращий кореляційний зв'язок між телеконекційними показниками та датами руйнування льодоставу і очищенням від льоду на водосховищах. Надалі саме для цих постів розробляли методики довгострокового прогнозування (табл. 2).

### Аналіз строків руйнування льодоставу і очищенням від льоду на гідрологічних постах-індикаторах водосховищ Дніпровського каскаду та визначення залежностей для довгострокового прогнозування.

На водосховищах Дніпровського каскаду середні, ранні і пізні дати руйнування льодоставу і очищення від льоду закономірно змінюються з півночі на південь відповідно до фізико-географічних умов їхнього формування та індивідуальних особливостей місць розташування гідрологічних постів-індикаторів. Дати руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах характеризуються значними коливаннями. Так, різниця між пізніми та ранніми датами їх настання становить близько трьох місяців. Допустимі похибки прогнозів коливаються в межах від 11 до 14 днів (табл. 2).

Середні багаторічні дати показують, що руйнування льодоставу на водосховищах відбувається у першій і другій декадах березня. Зазвичай найбільш ранні дати руйнування льодоставу спостерігаються

**Таблиця 1.** Показники якості методики за кількості членів ряду  $n \geq 25$

Категорія	$\bar{S}/\bar{\sigma}$	Коефіцієнт кореляції ( $R$ )	Забезпеченість допустимої похибки прогнозів ( $\delta_{\text{доп}}$ ), %
Добра	$\leq 0,50$	$\geq 0,87$	$\geq 82$
Задовільна	$0,51-0,80$	$0,86-0,60$	$81-60$

**Таблиця 2.** Статистичні характеристики рядів спостережень за строками руйнування льодоставу і очищенням від льоду на гідрологічних постах-індикаторах водосховищ Дніпровського каскаду

Назва поста	Період/тривалість спостережень, роки	Дата			$\Delta$ , доба	$\delta_{\text{доп}}$ , доба	$Z_{\text{серед}}$ , доба
		середня	рання	пізня			
<i>Руйнування льодоставу</i>							
вдсх Київське — с. Толокунь	1966—2020/54	20.03	23.01.1990	13.04.2013	80	13	27
вдсх Канівське — смт Ржищів	1978—2020/43	11.03	17.01.1989	08.04.1987	81	12	18
вдсх Кременчуцьке — с. Топилівка	1977—2020/44	17.03	23.01.1990	17.04.1987	84	12	24
вдсх Кам'янське — с. Мишуричів	1964—2020/57	12.03	21.01.1990	13.04.2003	82	11	19
вдсх Дніпровське — Микільське-на-Дніпрі	1964—2020/57	08.03	19.01.1990	04.04.1996	75	11	14
вдсх Каховське — с. Благовіщенка	1959—2020/62	02.03	14.12.1989	03.04.1987	110	14	9
<i>Очищення від льоду</i>							
вдсх Київське — с. Толокунь	1966—2020/54	25.03	04.02.1990	18.04.2013	73	12	20
вдсх Канівське — смт Ржищів	1978—2020/43	20.03	20.01.1990	17.04.2013	87	12	15
вдсх Кременчуцьке — с. Топилівка	1977—2020/44	21.03	02.02.1990	04.04.1996	76	12	16
вдсх Кам'янське — с. Мишуричів	1964—2020/57	18.03	25.01.1990	16.04.1987	81	11	13
вдсх Дніпровське — Микільське-на-Дніпрі	1964—2020/57	16.03	27.01.1990	14.04.1964	77	12	11
вдсх Каховське — с. Благовіщенка	1959—2020/62	14.03	25.01.1990	18.04.1987	83	12	9

*Примітка:*  $\Delta$  — різниця між пізньою та ранньою датами появи льодових явищ/встановлення льодоставу;  $\delta_{\text{доп}}$  — допустима похибка прогнозу;  $Z_{\text{серед}}$  — середня завчасність прогнозу (випуск прогнозу 22 лютого для руйнування льодоставу та 5 березня для очищення від льоду).

у січні, найбільш пізні — у першій і другій декадах квітня. Втім найбільш ранню дату руйнування льодоставу зафіксовано 14 грудня 1989 р. на Каховському водосховищі біля с. Благовіщенка, а найбільш пізню — 17 квітня у 1987 р. на Кременчуцькому водосховищі біля с. Топилівка. У середньому очищення від льоду на водосховищах відбувається у другій і третій декадах березня. Найбільш ранню дату очищення від льоду зафіксовано 20 січня 1990 р. на гідрологічному посту вдсх Канівське — смт Ржищів, а найбільш пізню — 18 квітня 1987 та 2013 рр. на постах вдсх Київське — с. Толокунь і вдсх Ка-

ховське — с. Благовіщенка відповідно.

**Телеконнекційні показники, як предиктори у прогнозах строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду.** Предиктори для довгострокового прогнозування визначено за найкращими кореляційними і регресійними зв'язками між 34 телеконнекційними показниками та датами руйнування льодоставу і очищення від льоду на гідрологічних постах-індикаторах водосховищ Дніпровського каскаду. Виявилось, що руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах переважно обумовлюються центрами дії ат-

мосфери та їхнім впливом на інтенсивність зональних і меридіональних переміщень повітряних мас у Північній і Східній Атлантиці (*EA, SCAND, EATL/WRUS*), Тихому океані (*Niño 1+2, Niño 3, Niño 4, WPpattern, SOI, Darwin, repac\_slpa*) (табл. 3, 4). Серед 11 телеконекційних показників найбільш впливають на руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах показники, що характеризують атмосферні процеси над північною і екваторіальною частинами Тихого океану. Вагомий вплив мають й атмосферні процеси у Північній і Східній Атлантиці, які виражені через три телеконекційні показники.

Такий результат є цілком логічним,

оскільки, як показано у роботі [Немченко, 2017] циркуляційні атмосферні процеси мають складний багатоступінчастий взаємозв'язок, до того ж, здебільшого процеси над Північно-тихоокеанським регіоном стимулюють Північно-атлантичне коливання. У статті [Rodríguez-Fonseca et al., 2016] показано вплив Південного коливання на атмосферні процеси Північної Атлантики. Отже, складність взаємозв'язків великомасштабних циркуляційних атмосферних процесів Тихоокеанського та Атлантичного регіонів і визначають мінливість й строки руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду.

**Т а б л и ц я 3. Залежності для довгострокового прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду**

Назва поста	Прогнозне рівняння	$\bar{S}/\bar{\sigma}$	$\delta_{\text{доп}}, \%$
<i>Руйнування льодоставу</i>			
вдсх Київське — с. Толокунь	$\Delta\Delta_p = -0,69 - 5,48 \cdot EA_{VIII} + 3,51 \cdot SOI_{VIII}$	0,92	70
вдсх Канівське — смт Ржищів	$\Delta\Delta_p = -0,83 - 7,92 \cdot repac\_slpa_V - 5,19 \cdot Darwin_I$	0,90	71
вдсх Кременчуцьке — с. Тошилівка	$\Delta\Delta_p = 1,18 - 7,70 \cdot AAO_I - 6,98 \cdot WP_I$	0,88	71
вдсх Кам'янське — с. Мишуричів	$\Delta\Delta_p = -0,70 - 3,20 \cdot EA_I - 2,31 \cdot Darwin_V$	0,96	63
вдсх Дніпровське — Микільське-на-Дніпрі	$\Delta\Delta_p = -0,53 - 4,17 \cdot EA_I + 1,59 \cdot EAWR_{VIII}$	0,93	63
вдсх Каховське — с. Благівіщенка	$\Delta\Delta_p = -1,50 - 4,57 \cdot Darwin_V - 2,52 \cdot Darwin_{IX}$	0,99	67
<i>Очищення від льоду</i>			
вдсх Київське — с. Толокунь	$\Delta\Delta_o = 135 - 7,69 \cdot repac\_slpa_V - 5,53 \cdot Niño\ 1+2_{VIII}$	0,91	70
вдсх Канівське — смт Ржищів	$\Delta\Delta_o = 0,44 - 5,44 \cdot AAO_I - 5,99 \cdot WP_I$	0,88	62
вдсх Кременчуцьке — с. Тошилівка	$\Delta\Delta_o = 0,12 - 4,67 \cdot Darwin_I - 9,06 \cdot repac\_slpa_V$	0,88	66
вдсх Кам'янське — с. Мишуричів	$\Delta\Delta_o = -0,97 - 2,82 \cdot Darwin_I - 3,67 \cdot SCAND_{IX}$	0,95	67
вдсх Дніпровське — Микільське-на-Дніпрі	$\Delta\Delta_o = 11,4 - 4,03 \cdot EA_{XII} - 0,50 \cdot Niño\ 3_{XI}$	0,94	61
вдсх Каховське — с. Благівіщенка	$\Delta\Delta_o = 38,3 - 5,19 \cdot Darwin_V - 1,39 \cdot Niño\ 4_{VIII}$	0,96	65

Примітка:  $\bar{S}$  — середня квадратична похибка перевірочних прогнозів;  $\bar{\sigma}$  — середнє квадратичне відхилення прогнозної величини;  $\delta_{\text{доп}}, \%$  — забезпеченість допустимої похибки методики;  $\Delta\Delta_p, \Delta\Delta_o$  — розраховані відхилення дат руйнування льодоставу і очищення від льоду від середньої дати, доба.

**Таблиця 4. Опис телеконнекційних показників, які використано як предиктори у прогнозних залежностях у табл. 3**

Телеконнекційний показник	Опис індексу	Рік початку розрахунків показника
East Atlantic (EA) pattern	Подібний до North Atlantic Oscillation pattern, але центри його аномалій зміщені на південний схід	1950
Scandinavia pattern (SCAND)	Визначається характером атмосферної циркуляції над Скандавією, Західною Європою та східною частиною РФ/західною частиною Монголії	1950
East Atlantic/ West Russia (EAWR/WRUS) pattern	Визначається характером атмосферної циркуляції над Європою, північною частиною Китаю, центром Північної Атлантики та північною частиною Каспійського моря	1950
Southern Oscillation Index (SOI)	Визначається за показниками атмосферного тиску на рівні моря на станціях Дарвін і Таїті	1951
Darwin Sea Level Pressure	Визначається за показниками атмосферного тиску на рівні моря на станції Дарвін (Австралія)	1951
WP pattern	Визначається характером атмосферної циркуляції над Камчаткою, частиною Південно-Східної Азії, західною субтропічною північною частиною Тихого океану, східною північною частиною Тихого океану, південно-західною частиною США	1950
repac_slpa	Визначається за показниками атмосферного тиску на рівні моря у східному екваторіальному районі Тихого океану у прямокутнику 5° пд.ш.—5° пн.ш., 80° зх.д.—130° зх.д.	1949
Antarctic oscillation (AAO) index	Визначається за значеннями аномалій тиску повітря у південних широтах (південніше 20° пд.ш.)	1979
Niño 1+2 (0-10° South) (90° West-80° West)	Визначається за температурою поверхні води Тихого океану у прямокутнику 0—10° пд.ш., 90—80° зх.д.	1950
Niño 3 (5° North-5° South) (150° West-90° West)	Визначається за температурою поверхні води Тихого океану у прямокутнику 5° пн.ш.—5° пд.ш., 150—90° зх.д.	1950
Niño 4 (5° North-5° South) (160° East-150° West)	Визначається за температурою поверхні води Тихого океану у прямокутнику 5° пн.ш.—5° пд.ш., 160° сх.д.—150° зх.д.	1950

Аналіз прогнозних залежностей, які наведено у табл. 3 за залежними даними, показав, що ці залежності цілком задовільно відтворюють історичні дати руйнування льодоставу і очищення від льоду водосховищ Дніпровського каскаду (див. приклад на рис. 2).

Прогнозні значення здебільшого не перевищують допустимі похибки прогнозів. Винятком є тільки значення екстремальних дат, що і обумовлює високі значення співвідношення середньої квадратичної похибки перевірочних прогнозів ( $\bar{S}$ ) до середнього квадратичного відхилення прогнозної величини ( $\bar{\sigma}$ ) (див. табл. 3). Зазначимо, що зазвичай ряди спостережень

містять всього декілька таких екстремальних значень (див. приклад на рис. 2). Разом з тим, як зазначено у праці [Попов, 1979], наявність навіть одного екстремального значення призводить до перевищення встановленої межі співвідношення. Водночас забезпеченість допустимих похибок методик дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на всіх постах-індикаторах відповідає оцінці якості «задовільно» згідно з табл. 1. Це дозволяє рекомендувати розроблені методики для прогнозування.

Довгострокове прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на інших гідрологічних постах на кожному із шести водосховищ виконується за



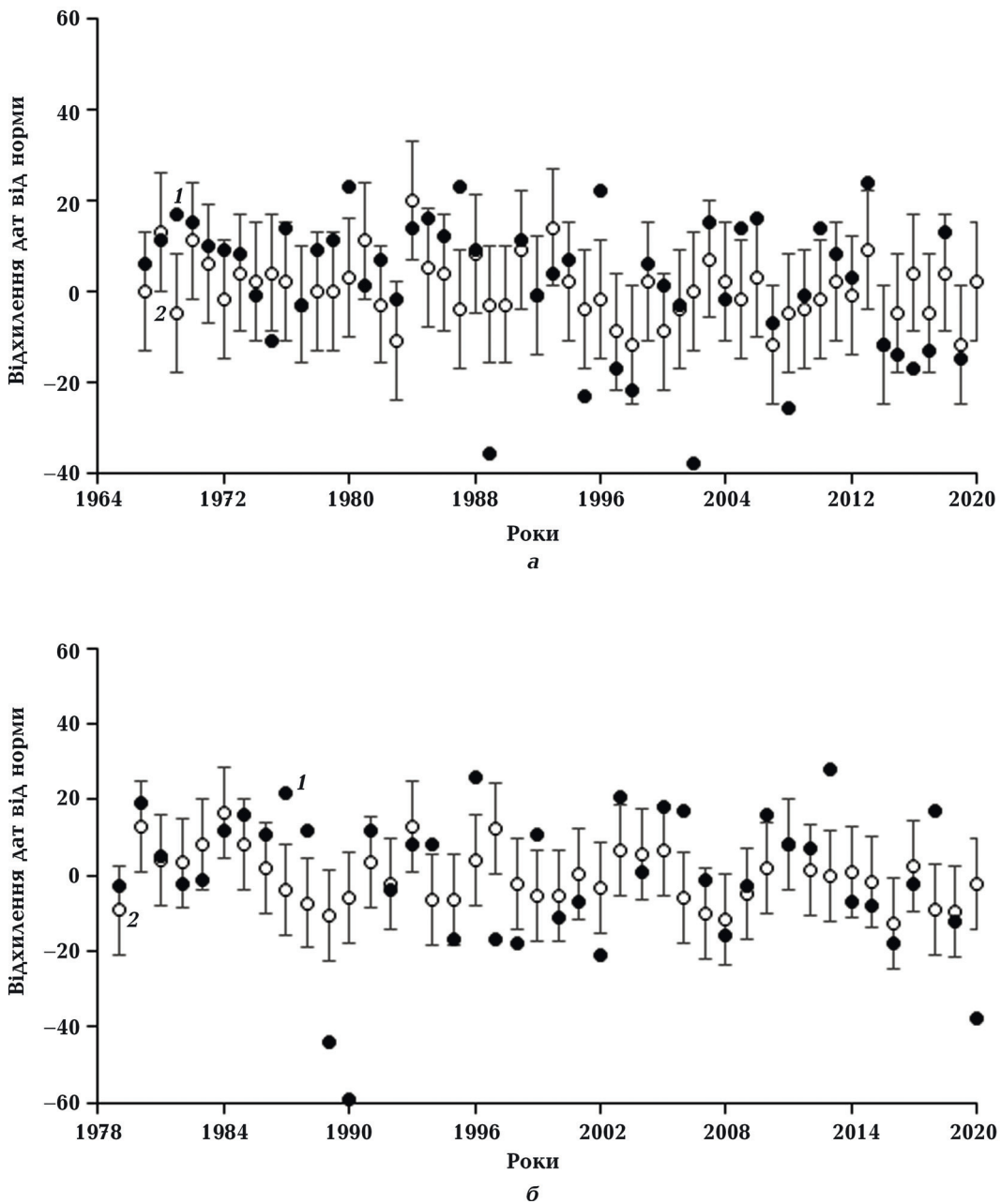


Рис. 2. Історичні (1) і прогнози з допустимою похибкою прогнозу (2) дати руйнування льодоставу на посту вдсх Київське — с. Толокунь (а) і дати очищення від льоду на посту вдсх Канівське — смт Ржищів (б).

Fig. 2. Historical (1) and forecast (with a forecast permissible error) break-up dates at (2) the Kyiv Reservoir near Tolokun village (a) and the dates of ice disappearance at the Kaniv Reservoir near Rzhishchiv village (b).

кореляційними залежностями між датами на цих постах ( $Y$ ) і датами на постах-індикаторах ( $X$ ) (табл. 5).

**Висновки.** Розроблено методики довгострокового прогнозування строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду

з використанням 34 телеконнекційних показників, а саме атмосферних індексів, індексів температури морської поверхні, телеконнекційних індексів і патернів. Прогнозні рівняння для визначених на кожному водосховищі постів-індикаторів містять 11 телеконнекційних показників за

**Таблиця 5. Кореляційні залежності для визначення відхилень від норми дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на гідрологічних постах водосховищ Дніпровського каскаду**

Назва поста	Руйнування льодоставу		Очищення від льоду	
	Залежність	$R^2$	Залежність	$R^2$
вдсх Київське — с. Дніпровське	$Y=0,85X-0,88$	0,92	$Y=0,90X-2,32$	0,93
вдсх Київське — м. Чорнобиль	$Y=1,06X-10,4$	0,78	$Y=0,96X-5,63$	0,90
вдсх Київське — с. Страхолісся	$Y=1,02X+1,08$	0,89	$Y=0,97X+0,02$	0,88
вдсх Київське — с. Лебедівка	$Y=0,98X+1,36$	0,96	$Y=0,97X+1,01$	0,93
вдсх Київське — м. Вишгород	$Y=1,01X-9,30$	0,84	$Y=0,97X+1,25$	0,87
вдсх Канівське — м. Київ	$Y=0,84X-26,9$	0,34	$Y=0,97X-12,3$	0,69
вдсх Канівське — м. Українка	$Y=1,04X-4,93$	0,92	$Y=1,13X-8,07$	0,83
вдсх Канівське — м. Переяслав	$Y=0,92X+4,30$	0,89	$Y=0,89X-2,72$	0,88
вдсх Канівське — м. Канів	$Y=0,88X+7,30$	0,86	$Y=0,96X+2,92$	0,84
вдсх Кременчуцьке — м. Канів	$Y=0,77X-34,0$	0,50	$Y=1,08X-19,9$	0,78
вдсх Кременчуцьке — с. Сокирне	$Y=1,09X-23,7$	0,71	$Y=1,25X-13,0$	0,87
вдсх Кременчуцьке — м. Черкаси	$Y=0,94X-8,45$	0,86	$Y=1,02X-5,55$	0,89
вдсх Кременчуцьке — порт Адамівка	$Y=0,94X+0,66$	0,95	$Y=0,92X+2,01$	0,95
вдсх Кременчуцьке — смт Градизьк	$Y=0,73X+3,45$	0,82	$Y=0,75X+4,01$	0,79
вдсх Кременчуцьке — м. Світловодськ	$Y=0,88X+0,19$	0,90	$Y=0,78X+5,59$	0,82
вдсх Кам'янське — м. Кременчук	$Y=0,85X-26,2$	0,44	$Y=0,75X-18,4$	0,38
вдсх Кам'янське-м. Верхньодніпровськ	$Y=0,88X+2,73$	0,86	$Y=0,85X+2,29$	0,75
вдсх Кам'янське — м. Кам'янське	$Y=0,91X+2,92$	0,84	$Y=0,84X+3,78$	0,78
вдсх Дніпровське — м. Кам'янське	$Y=0,68X-27,3$	0,27	$Y=0,81X-6,97$	0,69
вдсх Дніпровське — смт Сухачівка	$Y=0,79X-16,4$	0,44	$Y=0,93X-8,65$	0,71
вдсх Дніпровське — м. Дніпро	$Y=0,92X-11,3$	0,73	$Y=0,95X-8,67$	0,83
вдсх Дніпровське — смт Лоц-Кам'янка	$Y=0,98X-6,19$	0,89	$Y=1,04X-6,24$	0,89
вдсх Дніпровське — м. Запоріжжя	$Y=0,81X+3,84$	0,74	$Y=0,84X+2,59$	0,88
вдсх Каховське — с. Розумівка	$Y=0,53X-16,9$	0,41	$Y=0,82X-9,42$	0,76
вдсх Каховське — с. Плавні	$Y=0,70X+6,76$	0,67	$Y=0,92X-0,36$	0,83
вдсх Каховське — с. Вищетарасівка	$Y=0,68X+4,64$	0,78	$Y=0,91X+0,27$	0,93
вдсх Каховське — м. Нікополь	$Y=0,76X+1,38$	0,75	$Y=0,95X-1,42$	0,86
вдсх Каховське — Грушівська дамба	$Y=0,77X+10,0$	0,80	$Y=0,94X+2,27$	0,89
вдсх Каховське — смт Велика Лепетиха	$Y=0,68X+5,07$	0,66	$Y=0,97X-1,18$	0,85
вдсх Каховське — м. Нова Каховка	$Y=0,63X+2,0$	0,65	$Y=0,93X-1,07$	0,89

різні місяці, які характеризують процеси циркуляції атмосфери у Північній і Східній Атлантиці, північній і екваторіальній частинах Тихого океану. Перевірка розроблених методик за залежними даними показала, що забезпеченості допустимих похибок варіюють у межах 62—71 %, що відповідає оцінці якості методики «задовільно». Це дає змогу рекомендувати їх для використання в оперативному прогно-

зуванні. Прогнози можуть складатися на 22 лютого для дат руйнування льодоставу та 5 березня для дат очищення від льоду водосховищ за умови опублікування значень телеконнекційних показників на сайті NWS NOAA USA. Середня завчасність прогнозів коливається у межах від 9 до 27 діб для дат руйнування льодоставу та від 9 до 20 діб для дат очищення від льоду. Отримано кореляційні залежності для прогно-

зування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на інших гідрологічних постах на кожному із шести водосховищ.

На водосховищах Дніпровського каскаду дати руйнування льодоставу і очищення від льоду характеризуються значними коливаннями, обумовленими значною мінливістю атмосферних процесів над територією України у зимово-весняний період. Це значно утруднює розроблення методик довгострокового прогнозування строків руйнування льодоставу і очищення від льоду водосховищ.

Використання телеконекційних показників уперше дало можливість розробити методики довгострокового прогнозування

строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду. Отже, подібний підхід може бути використаний для розроблення методик довгострокового прогнозування інших характеристик льодового режиму як водосховищ, так і річок України.

*Дослідження виконано згідно з держбюджетною темою № 1/22 «Розроблення системи довгострокового прогнозування строків руйнування льодоставу та очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду» Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України (№ державної реєстрації 0122U002426).*

### Список літератури

- Вишневецький В.І., Заводцова А.М. Льодовий режим Дніпровських водосховищ. *Праці Центральної геофізичної обсерваторії*. 2009. Вип. 5(19). С. 46—54.
- Вишневецький В.І., Сташук В.А., Сакевич А.М. *Водогосподарський комплекс у басейні Дніпра*. Київ: Інтерпрес ЛТД, 2011. 188 с.
- Гусева А.А. *Анализ синоптических условий вскрытия и замерзания рек Украины и его применения в гидропрогностике этих явлений (отчет)*. Киев: Управление гидрометеоролог. службы УССР, 1947. 29 с.
- Лобода Н.С., Сіренко А.М. Вдосконалення методик прогнозування льодових явищ на річках України на основі багатовимірного статистичного аналізу. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2010. Т. 3. № 20. С. 21—29.
- Настанова з оперативної гідрології. Прогнози режиму вод суші. Гідрологічне забезпечення і обслуговування*. Київ: Укр. гідрометеоролог. центр, 2012. 120 с.
- Немченко К.С. *Взаємозв'язок циркуляційних атмосферних процесів Північнотихоокеанського регіону з кліматоутворюючими індексами: дипломний проект за спец. 103 Науки про Землю*. Одеса, 2017. 68 с.
- Постанова КМУ. *Про реалізацію експериментального проекту «Будівництво Каховського гідровузла на р. Дніпро. Вігбугова*
- після руйнування Каховської ГЕС та забезпечення сталої роботи Дніпровської ГЕС у період вігбудови»*. 18.07.2023. № 730. Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/prasearch?&num=730&category=3>.
- Попов Е.Г. *Гидрологические прогнозы*. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1979. 256 с.
- Сусідко М.М., Щербак А.В., Зеленська М.В., Данильчук В.І. Льодовий режим рівнинних річок і водосховищ України. Система короткотермінового прогнозування його характеристик. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2007. Т. 13. С. 62—84.
- Сутырина Е.Н. Методики долгосрочного прогнозирования сроков полного очищения ото льда водохранилищ Ангаро-Енисейского каскада. *Географ. вестник*. 2017. № 1(40). С. 66—72. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-1-66-72>.
- Хільчевський В.К., Гребінь В.В. Великі і малі водосховища України: регіональні та басейнові особливості поширення. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. № 2(60). С. 7—14. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.2.1>.
- Шимараев М.Н. Циркуляционные факторы изменений ледово-термического режима Байкала. *География и природные ресурсы*. 2007. № 4. С. 54—60.
- Bonsal, B.R., Prowse, T.D., Duguay, C.R., & La-

- croix, M.P. (2006). Impacts of large-scale teleconnections on freshwater-ice duration over Canada. *Journal of Hydrology*, 330(1-2), 340—353. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.022>.
- Brown, L.C., & Duguay, C.R. (2012). Modelling lake ice phenology with an examination of satellite detected sub-grid cell variability. *Advances in Meteorology*, 529064. <https://doi.org/10.1155/2012/529064>.
- Chen, C.-J., & Lee, T.-Y. (2017). An Investigation into the Relationship between Teleconnections and Taiwan's Streamflow. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 21, 3463—3481. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3463-2017>.
- Cook, T.L., & Bradley, R.S. (2010). An analysis of past and future changes in the ice cover of two High-Arctic lakes based on synthetic aperture radar (SAR) and LANDSAT imagery. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 42, 9—18. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-42.1.9>.
- Gauthier, Y., Paquet, L.-M., Gonzalez, A., & Bernier, M. (2008). Using radar and GIS to support ice-related flood forecasting. *Geomática*, 62(2), 139—149.
- Ghanbari, R.N., Bravo, H.R., Magnuson, J.J., Hyzer, W.G., & Benson, B.J. (2009). Coherence between lake ice cover, local climate and teleconnections (Lake Mendota, Wisconsin). *Journal of Hydrology*, 374(3-4), 282—293. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.024>.
- Girjatowicz, J.P. (2003). The influence of the North Atlantic Oscillation on ice conditions in coastal lakes of the southern Baltic Sea. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 39(1), 71—80. <https://doi.org/10.1051/limn/2003007>.
- Gozini, H., Wilson, S., Asadzadeh, M., Lees, K., & Kim, S. (2023). Statistical modeling of ice cover impact on flow conveyance in the Nelson River West Channel. *Canadian Water Resources Journal*, 48, 1—21. <https://doi.org/10.1080/07011784.2023.2218328>.
- Guo, X., Wang, T., Fu, H., Guo, Y., & Li, J. (2018). Ice-jam forecasting during river breakup based on neural network theory. *Journal of Cold Regions Engineering*, 32(3), 04018010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000168).
- Hubareva, V. (2023). Explosion of the Kakhovka Hydropower Plant: What are the environmental consequences? *Journal UWEC*, (14), 4—12. Retrieved from <https://uwecworkgroup.info/wp-content/uploads/2023/07/Issue-14english.pdf>.
- 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. *Proc. of the XVI Int. Sci. Conf. «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»*. Kyiv, Ukraine, November 15—18, 2022. *European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE)* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580071>.
- Khrystiuk, B., & Gorbachova, L. (2023). Long-term forecasting of appearance dates of ice phenomena and freeze-up at the Dnipro Cascade reservoirs by teleconnection indicators. *Acta Hydrologica Slovaca*, (1), 24—32. <https://doi.org/10.31577/ahs-2023-0024.01.0004>.
- Madaeni, F., Lhissou, R., Chokmani, K., Raymond, S., & Gauthier, Y. (2020). Ice jam formation, breakup and prediction methods based on hydroclimatic data using artificial intelligence: A review. *Cold Regions Science and Technology*, 174, 103032. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103032>.
- Ptak, M., Tomczyk, A.M., Wrzesiński, D., & Bednorz, E. (2019). Effect of teleconnection patterns on ice conditions in lakes in lowland Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 1961—1969. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02929-2>.
- Rodríguez-Fonseca, B., Suárez-Moreno, R., Ayarzagüena, B., López-Parages, J., Gómarra, I., Villamayor, J., Mohino, E., Losada, T., & Castaño-Tierno, A. (2016). A Review of ENSO Influence on the North Atlantic. A Non-Stationary Signal. *Atmosphere*, 7, 87. <https://doi.org/10.3390/atmos7070087>.
- 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, 103554. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103554>.
- Sanchez-Lopez, G., Hernández, A., Pla-Rabes, S., Toro, M., Granados, I., Sigró, J., Trigo, R.M., Rubio-Inglés, M.J., Camarero, L., Valero-Garcés, B., & Giral, S. (2015). The effects of the NAO on the ice phenology of Spanish alpine

- lakes. *Climatic Change*, 130, 101—113. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1353-y>.
- Schmidt, D.F., Grise, K.M., & Pace, M.L. (2019). High-frequency climate oscillations drive ice-off variability for northern hemisphere lakes and rivers. *Climatic Change*, 152, 517—532. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2361-5>.
- Soja, A.M., Kutics, K., Maracek, K., Molnár, G., & Soja, G. (2014). Changes in ice phenology characteristics of two central European steppe lakes from 1926 to 2012 — influences of local weather and large-scale oscillation patterns. *Climatic Change*, 126, 119—133. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1199-8>.
- Van den Dool, H.M. (2007). *Empirical methods in short-term climate prediction*. Oxford: Oxford University Press, 215 p.
- 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. <https://doi.org/10.15421/112019>.
- WMO-No. 168. *Guide to hydrological practices. Volume II: Management of water resources and application of hydrological practices. 6th ed.* (2009). Geneva: World Meteorological Organization, 324 p.

## Long-term forecasting methods of dates of ice break-up and disappearance at the Dnipro Cascade Reservoirs by teleconnection indicators

*B. Khrystiuk, L. Gorbachova, 2023*

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

Long-term forecasting of the ice regime at the Dnipro Cascade Reservoirs is very important, first of all, for the operation of hydroelectric power stations. In addition, such forecasts also ensure the work of other sectors of the economy, namely shipping, fisheries, municipal engineering, etc. At present, the Department for hydrological forecasting of the Ukrainian Hydrometeorological Center uses techniques developed in the middle and in the second half of the 20th century to compile long-term forecasts and advices about the ice regime of water bodies of Ukraine. These techniques were developed only for rivers; for reservoirs, they are currently lacking.

The main objective of our research is to develop methods for long-term forecasting of ice break-up and disappearance at the Dnipro Cascade Reservoirs by teleconnection indicators. The research was based on the records for 35 water gauges located on 6 reservoirs of the Dnipro Cascade, including the destroyed Kakhovka reservoir. The dates of the ice break-up and disappearance were used for the period from the beginning of observations at each water gauge to 2020. Moreover, the teleconnection indicators were used, namely 34 atmospheric indices, sea surface temperature indices, teleconnection indices and patterns determined by the National Weather Service (NWS) of the National Oceanic and Atmospheric Administration of United States of America (NOAA USA).

Methods of the long-term forecasting of the ice break-up and disappearance at the reservoirs of the Dnipro Cascade have been developed by searching for the best correlation or regression relationship between dates and teleconnection indicators. The probable of accepted errors of the developed methods are in the range of 62—71 %, which corresponds to satisfactory method quality that makes it possible to recommend them for use.

**Key words:** dates, ice phenomena, freeze-up, Dnipro Reservoirs, teleconnection indicators, forecasting equations.

## References

- Vyshnevskiy, V.I., & Zavodtsova, A.M. (2009). Ice regime of the Dnipro reservoirs. *Proceedings of the Central Geophysical Observatory*, (5), 46—54 (in Ukrainian).
- Vyshnevskiy, V.I., Stashuk, V.A., & Sakevych, A.M. (2011). *Water management complex in the Dnipro basin*. Kyiv: Interpress LTD, 188 p. (in Ukrainian).
- Guseva, A.A. (1947). *Analysis of the synoptic conditions of the opening and freezing of the rivers of Ukraine and its application in hydroprognostication of these phenomena (report)*. Kiev: Department of Hydrometeorological Service of the Ukrainian SSR, 29 p. (in Russian).
- Loboda, N.S., & Sirenko, A.M. (2010). The improvement of ice forecast for the Ukrainian rivers on basis of methods of multivariate statistical analysis. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 3(20), 21—29 (in Ukrainian).
- Manual on operational hydrology. *Forecasts of land water regime. Hydrological support and maintenance*. (2012). Kyiv: Ukraine hydrometeorologist center, 120 p. (in Ukrainian).
- Nemchenko, K.S. (2017). *Interrelation of circulation atmospheric processes of the North Pacific region with climate indices: diploma project on specialty 103 Earth Sciences*. Odesa, 68 p. (in Ukrainian).
- Resolution KMU. (2023). *On the implementation of the pilot project «Construction of the Kakhovka hydroelectric power station at the Dnipro River. Rebuilding after the destruction of Kakhovka HPP and ensuring the sustainable operation of Dnipro HPP during the reconstruction period»*. 18.07.2023. № 730. <https://www.kmu.gov.ua/npasearch?&num=730&category=3>. (in Ukrainian).
- Popov, E.G. (1979). *Hydrological forecasts*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 256 p. (in Russian).
- Susidko, M.M., Shcherbak, A.V., Zelenska, M.V., & Danylchuk, V.I. (2007). Ice regime of plain rivers and reservoirs of Ukraine. A system of short-term forecasting of its characteristics. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 13, 62—84 (in Ukrainian).
- Sutyryna, E.N. (2017). Long-term forecasting techniques for the terms of the complete disappearance of ice on reservoirs of the Angara-Yenisei cascade. *Geographical Bulletin*, (1), 66—72. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-1-66-72> (in Russian).
- Khilchevskiy, V.K., & Grebin, V.V. (2021). Large and small reservoirs of Ukraine: regional and basin distribution features. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, (2), 7—14. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.2.1> (in Ukrainian).
- Shimaraev, M.N. (2007). Circulation factors of changes in the ice-thermal regime of the Lake Baikal. *Geography and natural resources*, (4), 54—60 (in Russian).
- Bonsal, B.R., Prowse, T.D., Duguay, C.R., & Lacroix, M.P. (2006). Impacts of large-scale teleconnections on freshwater-ice duration over Canada. *Journal of Hydrology*, 330(1-2), 340—353. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.022>.
- Brown, L.C., & Duguay, C.R. (2012). Modelling lake ice phenology with an examination of satellite detected sub-grid cell variability. *Advances in Meteorology*, 529064. <https://doi.org/10.1155/2012/529064>.
- Chen, C.-J., & Lee, T.-Y. (2017). An Investigation into the Relationship between Teleconnections and Taiwan's Streamflow. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 21, 3463—3481. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3463-2017>.
- Cook, T.L., & Bradley, R.S. (2010). An analysis of past and future changes in the ice cover of two High-Arctic lakes based on synthetic aperture radar (SAR) and LANDSAT imagery. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 42, 9—18. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-42.1.9>.
- Gauthier, Y., Paquet, L.-M., Gonzalez, A., & Bernier, M. (2008). Using radar and GIS to support ice-related flood forecasting. *Geomatica*, 62(2), 139—149.
- Ghanbari, R.N., Bravo, H.R., Magnuson, J.J., Hyzer, W.G., & Benson, B.J. (2009). Coherence between lake ice cover, local climate and teleconnections (Lake Mendota, Wisconsin). *Journal of Hydrology*, 374(3-4), 282—293. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.024>.

- Girjatowicz, J.P. (2003). The influence of the North Atlantic Oscillation on ice conditions in coastal lakes of the southern Baltic Sea. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 39(1), 71—80. <https://doi.org/10.1051/limn/2003007>.
- Gozini, H., Wilson, S., Asadzadeh, M., Lees, K., & Kim, S. (2023). Statistical modeling of ice cover impact on flow conveyance in the Nelson River West Channel. *Canadian Water Resources Journal*, 48, 1—21. <https://doi.org/10.1080/07011784.2023.2218328>.
- Guo, X., Wang, T., Fu, H., Guo, Y., & Li, J. (2018). Ice-jam forecasting during river breakup based on neural network theory. *Journal of Cold Regions Engineering*, 32(3), 04018010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000168).
- Hubareva, V. (2023). Explosion of the Kakhovka Hydropower Plant: What are the environmental consequences? *Journal UWEC*, (14), 4—12. Retrieved from <https://uwecworkgroup.info/wp-content/uploads/2023/07/Issue-14english.pdf>.
- 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. *Proc. of the XVI Int. Sci. Conf. «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»*. Kyiv, Ukraine, November 15<sup>th</sup>–18, 2022. *European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE)* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580071>.
- Khrystiuk, B., & Gorbachova, L. (2023). Long-term forecasting of appearance dates of ice phenomena and freeze-up at the Dnipro Cascade reservoirs by teleconnection indicators. *Acta Hydrologica Slovaca*, (1), 24—32. <https://doi.org/10.31577/ahs-2023-0024.01.0004>.
- Madaeni, F., Lhissou, R., Chokmani, K., Raymond, S., & Gauthier, Y. (2020). Ice jam formation, breakup and prediction methods based on hydroclimatic data using artificial intelligence: A review. *Cold Regions Science and Technology*, 174, 103032. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103032>.
- Ptak, M., Tomczyk, A.M., Wrzesiński, D., & Bednorz, E. (2019). Effect of teleconnection patterns on ice conditions in lakes in lowland Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 1961—1969. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02929-2>.
- Rodríguez-Fonseca, B., Suárez-Moreno, R., Ayarzagüena, B., López-Parages, J., Gómara, I., Villamayor, J., Mohino, E., Losada, T., & Castaño-Tierno, A. (2016). A Review of ENSO Influence on the North Atlantic. A Non-Stationary Signal. *Atmosphere*, 7, 87. <https://doi.org/10.3390/atmos7070087>.
- 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, 103554. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103554>.
- Sanchez-Lopez, G., Hernández, A., Pla-Rabes, S., Toro, M., Granados, I., Sigró, J., Trigo, R.M., Rubio-Inglés, M.J., Camarero, L., Valero-Garcés, B., & Giralt, S. (2015). The effects of the NAO on the ice phenology of Spanish alpine lakes. *Climatic Change*, 130, 101—113. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1353-y>.
- Schmidt, D.F., Grise, K.M., & Pace, M.L. (2019). High-frequency climate oscillations drive ice-off variability for northern hemisphere lakes and rivers. *Climatic Change*, 152, 517—532. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2361-5>.
- Soja, A.M., Kutics, K., Maracek, K., Molnár, G., & Soja, G. (2014). Changes in ice phenology characteristics of two central European steppe lakes from 1926 to 2012 — influences of local weather and large-scale oscillation patterns. *Climatic Change*, 126, 119—133. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1199-8>.
- Van den Dool, H.M. (2007). *Empirical methods in short-term climate prediction*. Oxford: Oxford University Press, 215 p.
- 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. <https://doi.org/10.15421/112019>.
- WMO-No. 168. *Guide to hydrological practices. Volume II: Management of water resources and application of hydrological practices. 6th ed.* (2009). Geneva: World Meteorological Organization, 324 p.