

Б.Ф. Христюк

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

Український гідрометеоро-
логічний інститут
Державної служби України
з надзвичайних ситуацій
та НАН України, Київ

УДК 556.06+556.535(282.247.32)

DOI: <https://doi.org/10.15407/Meteorology2024.06.050>

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ДОВГОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ СТРОКІВ РУЙНУВАННЯ ЛЬОДОСТАВУ ТА ОЧИЩЕННЯ ВІД ЛЬОДУ НА ДНІПРОВСЬКИХ ВОДОСХОВИЩАХ

Стаття присвячена створенню автоматизованої системи "Ice-Spring" для довгострокового прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду шляхом написання комп'ютерної програми для її подальшого використання в оперативній роботі Українського гідрометеорологічного центру ДСНС України (УкрГМЦ). Для автоматизації процесу прогнозування створено програмне забезпечення системи "Ice-Spring", яке написано на мовах програмування C# та C++ у середовищі Visual Studio 2022 Community Edition у вигляді Windows форм та консольних додатків. Система "Ice-Spring" дозволяє кожного року виконувати довгострокове прогнозування дат руйнування льодоставу (20 лютого) та очищення від льоду (5 березня) на 36 гідрологічних постах водосховищ Дніпровського каскаду. Прогнозування здійснюється за 12 прогнозними залежностями на основі регресійних зв'язків між датами на постах-індикаторах та телеконнекційними показниками. При цьому, використовуються середні місячні значення 11 телеконнекційних показників, які впливають на процеси руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду і, які визначаються Національною службою погоди Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США. Прогнозування на інших постах виконується за 60 регресійними залежностями між датами на цих постах і датами на постах-індикаторах. Створене програмне забезпечення автоматизованої системи довгострокового прогнозування "Ice-Spring" пройшло успішне тестування і показало свою працездатність за незалежними даними 2021 року. При цьому, виконана перевірка ефективності прогнозування надала прийнятні результати, оскільки з 12 прогнозів тільки 2 прогнози не справдились. Система "Ice-Spring" передана в УкрГМЦ для випробування і оперативного використання.

Ключові слова: довгострокове прогнозування, руйнування льодоставу, очищення від льоду, Дніпровські водосховища, програмне забезпечення, автоматизована система.

ВСТУП

Автоматизація процесу гідрологічного прогнозування є важливою частиною створення будь-якої сучасної системи, комплексу, які дозволяють складати прогнози гідрологічних характеристик різної завчасності (Lewis et al., 2018; Škerjanec, 2022). Зазвичай системи прогнозування використовують значні масиви гідрометеорологічної інформації (історичної, прогнозної), які зберігаються у різних базах даних. В основі таких систем прогнозування є гідрологічна модель. У процесі гідрологічного моделювання, а також для представлення його результатів можуть використовуватися географічні інформаційні системи (ГІС), які мають свої бази даних. Іноді результати моделювання необхідно надавати у зручній для користувача формі, що вимагає

створення окремого програмного забезпечення (Христюк, 2023). Отже, процес гідрологічного прогнозування є досить складним і важким завданням для гідролога-прогнозиста, який ще і потребує досить швидкого виконання для своєчасного оперативного інформування як громадськості, так і відповідних державних структур. Складність такого процесу характерна навіть для прогнозування гідрологічних характеристик для малих водозборів річок. Зрозуміло, що для середніх і великих річок складність підвищується у декілька разів. Саме тому, як показано у праці Жаннетти Шакірзанової (2023) сучасне гідрологічне прогнозування базується на автоматизованих комп'ютерних моделювальних системах або комплексах. Отже, об'єднання всього процесу гідрологічного прогнозування в єдину

автоматизовану систему є важливим завданням, яке дозволяє спростити і пришвидшити складання гідрологічних прогнозів.

Сьогодні у світі використовуються різноманітні моделювальні комплекси як для коротко-, так і для довгострокового гідрологічного прогнозування. Так, наприклад, автоматизований підхід до гідрологічного моделювання та моделювання якості води в масштабі водозбірного басейну р. Картейра (Португалія), який автоматично створює відповідні моделі на основі знань про моделювання предметної області та даних вимірювань представлено у праці Škerjanec M. (2022). Центр повеней штату Айова розробив систему прогнозування повеней і розповсюдження інформації в реальному часі для використання всіма жителями Айови (Krajewski et al., 2017). Для річки ВуГіа-Тху Бон, яка розташована у провінції Куанг Нам у В'єтнамі була випробувана система прогнозування повеней у реальному часі, яка об'єднує системи гідрологічного та гідравлічного моделювання на основі моделей SWAT і HEC-RAS, мережу метеорологічних станцій і гідрологічних постів з веб-візуалізацією результатів моделювання (Loi et al, 2019).

В Україні також створені автоматизовані системи гідрологічного прогнозування, які використовуються Українським гідрометеорологічним центром (УкрГМЦ) в оперативному прогнозуванні. Розробкою і створенням автоматизованих систем прогнозування водного стоку річок займався Михайло Сусідко, а також його учні — Ольга Лук'янець, Тетяна Маслова, Вероніка Дутко (2000, 2004, 2007, 2010), Наталія Приймаченко (2010), Станіслав Москаленко (2013). Ці автоматизовані системи прогнозування написані на мові програмування Fortran і описують процеси формування стоку води різного генезису р.р. Прип'ять, Дніпро, Дністер, Південний Буг, Західний Буг, Сіверський Донець, Тиса. У працях Євгенія Гопченко і Жанетти Шакірзанової (2006, 2015) розроблено автоматизовані моделювальні комплекси довгострокового прогнозування гідрологічних характеристик рівнинних річок. Борисом Христюком розроблено аналітично-експертна система "Істер" для прогнозування рівнів води на р. Дунай (2013), автоматизовані системи для короткострокового прогнозування: "Dniester-Influx"(2017) (приплив води до Дністровського водосховища та "FFS Striy" (2022) (паводки у басейні р. Стрий).

УкрГМЦ має також автоматизовані системи прогнозування льодового режиму річок і водосховищ України. Так, Михайлом Сусідко та ін. (2007) розроблена автоматизована система короткострокового прогнозування характеристик льодового режиму рівнинних річок і водосховищ України. Борисом

Христюком (2023) розроблено автоматизовану систему "Ice-Autumn" для довгострокового прогнозування дат появи льодових явищ та встановлення льодоставу на водосховищах Дніпровського каскаду. Разом з цим, УкрГМЦ випускає також довгострокові прогнози щодо настання строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду. Методика для створення таких прогнозів представлена у праці Бориса Христюка та Людмили Горбачової (2023), але відповідної автоматизованої системи не було створено.

Метою дослідження є створення автоматизованої системи довгострокового прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду шляхом написання комп'ютерної програми для її подальшого використання в оперативній роботі УкрГМЦ.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Впродовж 20-го століття на р. Дніпро було створено шість водосховищ, які послідовно було об'єднано в єдиний водогосподарський комплекс (Водний фонд України, 2014) (рис. 1). Цей комплекс дозволяв виробляти електроенергію, забезпечував водою мільйони людей і велику кількість промислових та сільськогосподарських підприємств і комунальних господарств, а також, особливо остан-

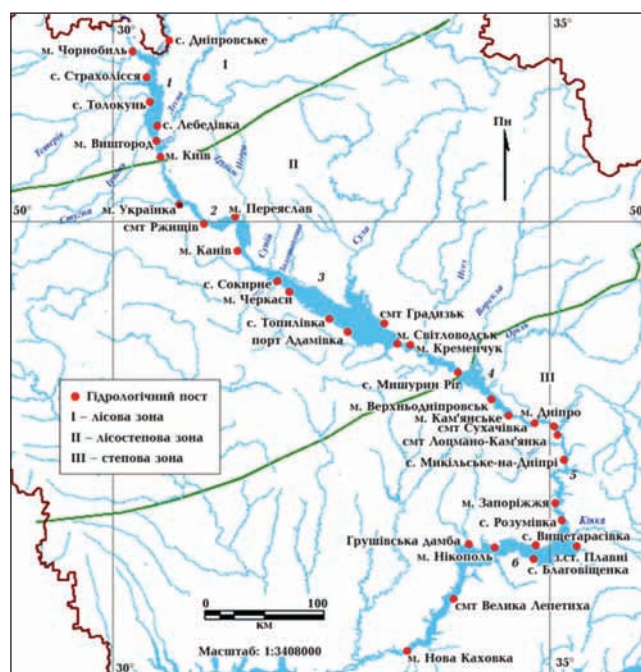


Рис. 1. Каскад Дніпровських водосховищ та схема розташування гідрологічних постів: 1 — вдсх Київське; 2 — вдсх Канівське; 3 — вдсх Кременчуцьке; 4 — вдсх Кам'янське; 5 — вдсх Дніпровське; 6 — вдсх Каховське, наведено у межах до 06.06.2023 (Христюк та Горбачова, 2023)

нім часом, був важливою транспортною артерією і рекреаційною зоною (Вишневський та ін., 2011). На жаль, російські окупанти вночі 6 червня 2023 року підірвали Каховську гідроелектростанцію (ГЕС), 22 березня 2024 року вдарили ракетами по греблі Дніпровської ГЕС, влучивши в ГЕС-1 і ГЕС-2, а 26 серпня 2024 року також відбулася ракетна атака по греблі Київської ГЕС. Як наслідок, Каховська і Дніпровська ГЕС були повністю зруйновані, Київська ГЕС отримала значні пошкодження, а Каховське водосховище було зневоднено (Чорноморець та ін., 2023). Отже, сьогодні каскад Дніпровських водосховищ може виконувати свої функції лише частково. Разом з цим, в таких складних умовах воєнного часу актуальність прогнозування льодових явищ зростає, оскільки вони безпосередньо впливають на роботу гідротехнічних споруд (Сусідко та ін., 2007; Христюк, 2013). Необхідно врахувати і той факт, що Кабінетом міністрів України прийнято рішення згідно якого у післявоєнний час планується відбудова Каховської ГЕС та наповнення Каховського водосховища (Постанова Кабінету міністрів України, 2023). Отже, у дослідженні створення автоматизованої системи довгострокового прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду виконано для 36 гідрологічних постів, які розташовані на шести водосховищах Дніпровського каскаду.

Вихідними даними для створення такої системи слугували, перш за все, методики, які було розроблено у праці Бориса Христюка та Людмили Горбачової (Христюк та Горбачова, 2023). Отже, було використано наступні дані:

- 12 регресійних рівнянь, які відображають залежність між датами руйнування льодоставу (6 рівнянь) і очищення від льоду (6 рівнянь) на постах-індикаторах та телеконнекційними показниками;
- 60 регресійних рівнянь, які відображають залежність між датами руйнування льодоставу (30 рівнянь) і очищення від льоду (30 рівнянь) на постах-індикаторах та датами на інших постах водосховищ;
- середні місячні значення 11 телеконнекційних показників, які впливають на процеси руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду і, які визначаються Національною службою погоди (National Weather Service, NWS) Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США (National Oceanic & Atmospheric Administration USA, NOAA) і наводяться на їхньому сайті https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/MD_index.php.

Алгоритм створення автоматизованої системи прогнозування (АСП) відображає послідовні кроки,

які взаємопов'язані між собою (Бандоріна та ін., 2022). Так, на першому етапі виконується розроблення структури АСП, яка охоплює всі необхідні її функції. Наступним важливим етапом є аналіз вихідних даних та їхнє упорядкування, яке визначає першочерговість використання необхідних даних для проведення розрахунків за прогнозними регресійними рівняннями. Мова програмування, на якій буде написано програмне забезпечення вибирається з міркувань можливостей розробників, технічних характеристик наявної комп'ютерної техніки тощо. Розроблення програмного забезпечення є важливою складовою, оскільки його якість визначає подальші експлуатаційні можливості АСП. Зазвичай програмне забезпечення складається з декількох окремих програм, кожна з яких забезпечує роботу окремої функції АСП. Саме тому, на етапі тестування АСП важливо виявити всі недоліки та неузгодженості у програмному забезпеченні. Після цього, необхідно забезпечити можливість користування розробленою АСП гідрологами-прогнозистами, тобто розробити інструкцію зі встановлення АСП на персональний комп'ютер, а також посібник користувача. В останньому надається детальний опис усіх етапів створення прогнозної продукції і її представлення у необхідній формі.

РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХНЄ ОБГОВОРЕННЯ

Розроблено структуру АСП, яка дозволяє виконувати довгострокове прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду за прогнозними регресійними залежностями для 36 гідрологічних постів (рис. 2).

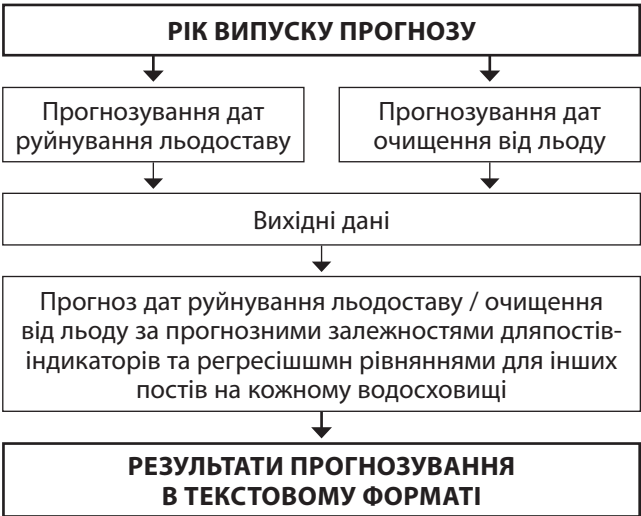


Рис. 2. Блок-схема автоматизованої системи довгострокового прогнозування (АСДП) "Ice-Spring" строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду

Програмне забезпечення АСДП "Ice-Spring" написано на мовах програмування C# та C++ у середовищі Visual Studio 2022 Community Edition у вигляді Windows форм та консольних додатків. Вибір цих мов програмування зумовлюється їхньою універсальністю і простотою використання, що дозволяє досить швидко створювати програмний код. Окрім цього, мови C# та C++ розроблені саме для створення прикладного програмного забезпечення, що і забезпечило їм широке використання у світі (Petzold, 2002; Прокопенко та ін., 2024). Отже, програмне забезпечення АСДП "Ice-Spring" виконано у формі додатку Ice-Spring.exe і має розмір 200 Мб, встановлюється на персональний комп'ютер на диск D у середовищі Windows 10 (64 біт).

Для швидкого оволодіння необхідними навичками з використання АСДП "Ice-Spring" розроблено посібник користувача, який дозволяє виконувати прогнозування послідовно (крок за кроком) від активації додатку Ice-Spring.exe до отримання результатів прогнозування. АСДП "Ice-Spring" дозволяє виконувати прогнозування строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду раз в рік, а саме 20 лютого для руйнування льодоставу та 5 березня для очищення від льоду. При цьому, необхідною умовою є наявність значень 11 телеконнекційних індексів та паттернів, які є складовими прогнозних регресійних рівнянь, на сайті NOAA по січень поточного року, включно. Зазвичай, необхідна інформація на сайті з'являється вчасно, але перед початком прогнозування потребує обов'язкової перевірки.

Процес прогнозування у АСДП "Ice-Spring" розпочинається з активації додатку Ice-Spring.exe. Після його запуску на екрані монітора комп'ютера з'являється вікно під назвою Form 1 (рис. 3а). У цьому вікні гідрологу-прогнозисту необхідно вказати рік

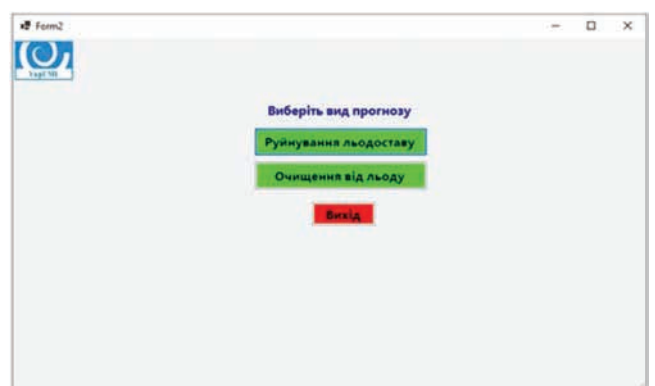
випуску прогнозу, який може перебувати у межах 2000–3000 рр. Так, якщо прогнозування відбувається 20 лютого 2021 року, тобто прогнозуються дати руйнування льодоставу на водосховищах, то необхідно просто ввести 2021. У разі введення року в іншому форматі у вікні Form 1 з'явиться повідомлення "Помилкова дата". Після цього, необхідно натиснути кнопки "Ок" або "Вихід" і відбудеться припинення роботи додатку. Надалі, необхідно запустити додаток Ice-Spring.exe ввести дату у правильному форматі. Для продовження процесу прогнозування користувачу необхідно натиснути кнопку "Ок", що дозволяє перейти до наступного вікна Form 2 (рис. 3б). Разом з цим, якщо користувачу потрібно, то він може перервати процес прогнозування натиснувши кнопку "Вихід". Така можливість закладена на кожному етапі прогнозування, тобто у всіх вікнах АСДП "Ice-Spring".

У вікні Form 2 гідролог-прогнозіст може вибрати необхідний вид прогнозування натиснувши кнопки "Руйнування льодоставу" або "Очищення від льоду" і перейти у вікно Form 3 (рис. 4а). Вікно Form 3 дозволяє виконувати збір вихідних даних автоматично кросс-платформною утилітою curl.exe, яка є невід'ємною частиною додатку Ice-Spring.exe. Згідно методик, які розроблено у праці (Христюк та Горбачова, 2023) для кожного виду прогнозування відбувається автоматичне копіювання свого набору значень телеконнекційних індексів та паттернів з сайту NOAA у папку d:\Ice-SPRING\Index. Це надає можливість користувачу перевірити наявність їхніх значень. У разі відсутності необхідних значень телеконнекційних показників на сайті NOAA за вказаний користувачем рік АСДП "Ice-Spring" припиняє роботу.

Вікно Form 4 дозволяє безпосередньо виконати розрахунки за допомогою допоміжної програми



а



б

Рис. 3. Вікна Form 1 (а) та Form 2 (б) АСДП "Ice-Spring" строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду



Рис. 4. Вікна Form 3 (а) та Form 4 (б) АСДП “Ice-Spring” строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду

Raschet.exe, активація якої розпочинається після натискання кнопки “Виконати розрахунки” (рис. 4б). Спочатку виконуються розрахунки згідно прогнозних регресійних рівнянь, які відображають залежність між датами руйнування льодоставу або очищення від льоду на постах-індикаторах та телеконекційними показниками. Надалі розрахунки продовжуються за регресійними рівняннями, які відображають залежність між датами руйнування льодоставу або очищення від льоду на постах-індикаторах та датами на інших постах водосховищ. У разі виконання прогнозування у високосний рік автоматично враховується наявність додаткового дня у лютому місяці. Результати розрахунків записуються до файлу “Prognoz.txt” (рис. 5).

Обраний формат файлу результатів зумовлено побажаннями гідрологів-прогнозистів УкрГМЦ, які

надають зацікавленим споживачам консультації щодо строків руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду. Як показано на рис. 5, файл результатів містить прогнозні дати, а також дати, які є нормами (середнє багаторічне значення) для рядів спостережень на постах-індикаторах. Це дозволяє прогнозисту виконати первинний аналіз отриманих результатів прогнозування. Отже, створене програмне забезпечення АСДП “Ice-Spring” пройшло успішне тестування і показало свою працездатність, про що свідчать результати прогнозів отримані для 2021 року, фрагмент яких наведено на рис. 5. Окрім цього, виконано оцінювання результатів прогнозування системою “Ice-Spring” дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду за незалежними даними на

Прогноз дат руйнування льодоставу на водосховищах Дніпровського каскаду у 2021 р.			
		Київське водосховище	
с.	Толокунь (норма - 20.III)	-	15.III
р.	Дніпро - с. Дніпровське	-	15.III
р.	Прип'ять - м. Чорнобиль	-	04.III
с.	Страхолисся	-	16.III
с.	Лебедівка	-	16.III
м.	Вишгород	-	05.III
		Канівське водосховище	
сmt	Ржищів (норма - 13.III)	-	05.III
м.	Київ	-	07.11
м.	Українка	-	28.11
м.	Переяслав-Хмельницький	-	10.III
м.	Канів	-	13.III

Рис. 5. Фрагмент файлу “Prognoz.txt” АСДП “Ice-Spring”

Таблиця 1. **Перевірка результатів прогнозування системою “Ice-Spring” дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду за незалежними даними на прикладі 2021 року для постів-індикаторів**

Назвапоста	Дати			δ _{доп} доба	Справджу- ваність
	норма	прогнозна	історична		
Руйнування льодоставу					
Вдсх Київське — с. Толокунь	20.03	15.03	20.03	±13	Так
ВдсхКанівське — смт Ржищів	11.03	05.03	03.03	±12	Так
вдсхКременчуцьке — с. Топилівка	17.03	21.02	20.03	±12	Ні
Вдсх Кам'янське — с. Мишурин Ріг	12.03	10.03	17.03	±11	Так
Вдсх Дніпровське –Микільське-на-Дніпрі	08.03	08.03	05.03	±11	Так
Вдсх Каховське — с. Благовіщенка	02.03	26.02	02.03	±14	Так
Очищення від льоду					
Вдсх Київське — с. Толокунь	25.03	20.03	22.03	±12	Так
Вдсх Канівське — смт Ржищів	20.03	28.02	17.03	±12	Ні
Вдсх Кременчуцьке — с. Топилівка	21.03	14.03	21.03	±12	Так
Вдсх Кам'янське — с. Мишурин Ріг	18.03	22.03	25.03	±11	Так
Вдсх Дніпровське — Микільське-на-Дніпрі	16.03	19.03	10.03	12	Так
Вдсх Каховське — с. Благовіщенка	14.03	09.03	03.03	12	Так

Примітка: $\delta_{\text{доп}}$ — допустима похибка прогнозу.

прикладі 2021 року за прогнозними регресійними рівняннями, які розроблено для постів-індикаторів (табл. 1).

Аналіз табл. 1 показує, що АСДП “Ice-Spring” цілком прийнятно прогнозує дати руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду. Так, з 12 прогнозів тільки 2 прогнози не справдились. Зрозуміло, що перевірка результатів прогнозування лише за даними одного року не є достатньою, оскільки ефективність прогнозування визначається статистичною обробкою накопичених рядів прогнозів (Guide to Hydrological Practices, 2009). Разом з цим, отримані результати дозволяють передати АСДП “Ice-Spring” у відділ гідрологічних прогнозів УкрГМЦ для подальшого випробування та оцінювання ефективності з метою впровадження в оперативному прогнозуванні.

ВИСНОВКИ

Сучасне прогнозування гідрологічних характеристик відбувається на основі автоматизованих комплексів та систем, які дозволяють об'єднувати і узгоджувати всі складові частини процесу прогнозування від збору вихідних даних, розрахунків і моделювання до остаточних результатів. Це значно пришвидшує і спрощує роботу гідрологів-прогнозістів та дозволяє своєчасно забезпечувати користувачів прогножною продукцією.

Вперше розроблено і створено програмне забезпечення для автоматизованої системи довго-

строкового прогнозування “Ice-Spring”, яка дозволяє виконувати прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду на 36 гідрологічних постах. Для написання кодів програм використано мови програмування C# та C++ у середовищі VisualStudio 2022 Community Edition. Програмне забезпечення створено у вигляді Windows форм та консольних додатків. В основі системи “Ice-Spring” є методики довгострокового прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на 6 водосховищах Дніпровського каскаду. Вони містять регресійні залежності між датами руйнування льодоставу і очищення від льоду на постах-індикаторах та телеконекційними показниками, а також між датами на постах-індикаторах і датами на інших постах в межах певного водосховища. Виконане тестування системи “Ice-Spring” за даними 2021 року показало її працездатність, а перевірка ефективності прогнозування надала прийнятні результати, що дозволяє передати системи “Ice-Spring” для оперативного використання в УкрГМЦ. Розроблено посібник користувача системи “Ice-Spring”.

Описані у статті підходи по автоматизації процесу довгострокового прогнозування дат руйнування льодоставу і очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду можуть бути використані для створення інших систем прогнозування, оскільки вирізняються простотою, швидкістю реалізації та зручністю використання для користувачів.

Дане дослідження виконано згідно держбюджетної теми № 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).

ЛІТЕРАТУРА

- Бандоріна, Л.М., Климкович, Т.О., & Удачина, К.О. (2022). Основи алгоритмізації та програмування: навчальний посібник. Дніпро: УДУНТ.
- Вишневецький, В.І., Сташук, В.А., & Сакевич, А.М. (2011). Водогосподарський комплекс у басейні Дніпра. Київ: Інтерпрес ЛТД.
- Водний фонд України. Штучні водойми. Водосховища і ставки. (2014). За ред. В.К. Хільчевського, В.В. Гребеня. Київ: Інтерпрес ЛТД.
- Гопченко, Є.Д., Шакірзанова, Ж.Р., Андрієвська, Г.М. (2006). Довгострокове просторове прогнозування максимального весняного стоку на основі автоматизованого комп'ютерного комплексу. *Наук. праці УкрНДГМІ*, 255, 228–240.
- Лук'янець, О.І., Сусідко, М.М. (2004). Комплексна басейнова система прогнозування паводків у Закарпатті: методична та технологічна база її складових. *Наук. праці УкрНДГМІ*, 253, 234–249.
- Маслова, Т.В., Сусідко, М.М. (2007). Оцінювання зволоженості гірських водозборів при математичному моделюванні дощових паводків. *Наук. праці УкрНДГМІ*, 256, 233–238.
- Москаленко, С.О. (2013). Прогнозування дощових паводків на річках правобережжя Прип'яті на основі моделювання процесів їх формування. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.07. Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ.
- Постанова Кабінету міністрів України (2023). Про реалізацію експериментального проекту "Будівництво Каховського гідровузла на р. Дніпро. Відбудова після руйнування Каховської ГЕС та забезпечення сталої роботи Дніпровської ГЕС у період відбудови". Постанова від 18.07.2023, № 730. Отримано 24 грудня 2024 із <https://www.kmu.gov.ua/npasearch?&num=730&category=3>
- Приймаченко, Н.В. (2010). Обґрунтування системи розрахунку характеристик паводків на гірських річках басейну Дністра на основі математичного моделювання процесів формування дощового стоку. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.07. Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ.
- Прокопенко, О.В., Попов, М.О., & Чумак, Г.І. (2024). Мова програмування С/С++. Практикум: навчальний посібник. Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка.
- Сусідко, М.М. (2000). Математичне моделювання процесів формування стоку як основа прогностичних систем. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 1, 32–40.
- Сусідко, М.М., Щербак, А.В., Зеленська, М.В., Данильчук, В.І. (2007). Льодовий режим рівнинних річок і водосховищ України. Система короткотермінового прогнозування його характеристик. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 13, 62–84.
- Христюк, Б.Ф. (2013). Аналітично-експертна система прогнозування рівнів води судохідного Дунаю "Істер". *Наук. праці УкрНДГМІ*, 264, 72–81.
- Христюк, Б.Ф. (2023). Автоматизована система "Ice-Autumn" для довгострокового прогнозування дат появи льодових явищ та встановлення льодоставу на водосховищах Дніпровського каскаду. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 4 (70), 39–50. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.4.3>
- Христюк, Б.Ф., Горбачова Л.О. (2023). Методики довгострокового прогнозування строків руйнування льодоставу та очищення від льоду на водосховищах Дніпровського каскаду за телеконекційними показниками. *Геофізичний журнал*, 45 (6), 87–101. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i6.293309>
- Шакірзанова, Ж.Р. (2015). Довгострокове прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок та естуаріїв території України. Одеса: ТОВ "Плутон".
- Шакірзанова, Ж.Р., Перевозчиков, І.М., Шевченко, О.П. (2023). Застосування методу територіальних довгострокових прогнозів для визначення максимальних витрат води в умовах формування весняного водопілля 2022–2023 року в басейні р. Десна. *Український гідрометеорологічний журнал*, 31, 5–21. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.023.01>
- Чорноморець, Ю.О., Перевозчиков, І.М., Орещенко, А.В., Мала, Л.М. (2023). Визначення стокових характеристик нижнього Дніпра з урахуванням підриву дамби Каховської ГЕС. *Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля*, 2 (4), 51–61. <http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.051>
- Guide to Hydrological Practices (2009). Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. Vol. II. Sixth edition. WMO-No. 168. Geneva: World Meteorological Organization.
- Khrystyuk, B. (2017). Short-term forecasting of water inflow to Dniester reservoir using numerical weather forecast model data. In: P. Ninov, E. Bojilova (Eds.), XXVII Conference of the Danubian countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management (26–28 September 2017, Golden Sands, Bulgaria), (p. 44).
- Khrystiuk, B., Gorbachova, L., Shpyg, V. (2022). Verification of the automated flood forecasting system on the Stryi River. *Acta Hydrologica Slovaca*, 23 (2), 234–240. <https://doi.org/10.31577/ahs-2022-0023.02.0026>
- Krajewski, W.F., Ceynar, D., Demir, I., Goska, R., Kruger, A., Langel, C., Mantilla, R., Niemeier, J., Quintero, F., Seo, B.-C., Small, S.J., Weber, L.J., Young, N.C. (2017). Real-Time Flood Forecasting and Information System for the State of Iowa. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98 (3), 539–554. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00243.1>
- Lewis, E., Birkinshaw, S., Kilsby, C., Fowler, H.J. (2018). Development of a system for automated setup of a physically-based, spatially-distributed hydrological model for catchments in Great Britain. *Environmental Modelling & Software*, 108, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.07.006>
- Loi, N.K., Liem, N.D., Tu, L.H., Hong, N.T., Truong, C.D., Tram, V.N.Q., Nhat, T.T., Anh, T.N., Jeong, J. (2019). Automated procedure of real-time flood forecasting in Vu Gia — Thu Bon River basin, Vietnam by integrating SWAT and HEC-RAS models. *Journal of Water and Climate Change*, 10 (3), 535–545. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.015>

- Petzold, C. (2002). Programming Microsoft Windows with C#. Microsoft Press.
- Škerjanec, M. (2022). Automated catchment scale modelling of hydrological phenomena and water quality. *Acta hydro-technica*, 35/62, 1–18. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2022.01>
- ## REFERENCES
- Bandorina, L.M., Klymkovich, T.O., & Udachyna, K.O. (2022). Fundamentals of algorithmization and programming: a textbook. Dnipro: UDUNT. [in Ukrainian]
- Chornomorets, Y.O., Perevozchikov, I.M., Oreshchenko, A.V., & Mala, L.M. (2023). Determination of flow characteristics of the lower Dnipro taking into account the explosion of Kahovka HPP. *Meteorology. Hydrology. Environmental monitoring*, 2 (4), 51–61. <http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.051> [in Ukrainian]
- Gopchenko, E.D., Shakirzanova, Z.R., & Andriyevska, G.M. (2006). Long-term spatial forecasting of maximum spring flow based on an automated computer complex. *Nauk. pratsi UkrNDGMI*, 255, 228–240. [in Ukrainian]
- Guide to Hydrological Practices (2009). Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. Vol. II. Sixth edition. WMO-No. 168. Geneva: World Meteorological Organization.
- Khrystiuk, B.Ф. (2013). The analytical and expert system for the forecasting of the water levels of the navigable part of Danube "Ister". *Nauk. pratsi UkrNDGMI*, 264, 72–81. [in Ukrainian]
- Khrystiuk, B. (2017). Short-term forecasting of water inflow to Dniester reservoir using numerical weather forecast model data. In: P. Ninov, E. Bojilova (Eds.), XXVII Conference of the Danubian countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management (26–28 September 2017, Golden Sands, Bulgaria), (p. 44).
- Khrystiuk, B.F. (2023). Automated "Ice-Autumn" system for long-term forecasting of appearance dates of ice phenomena and freeze-up at the Dnipro Cascade reservoirs. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 4 (70), 39–50. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.4.3> [in Ukrainian]
- Khrystiuk, B.F., & Gorbachova, L.O. (2023). Long-term forecasting methods of dates of ice break-up and disappearance at the Dnipro Cascade Reservoirs by teleconnection indicators. *Geophysical Journal*, 45 (6), 87–101. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i6.293309> [in Ukrainian]
- Khrystiuk, B., Gorbachova, L., & Shpyg, V. (2022). Verification of the automated flood forecasting system on the Stryi River. *Acta Hydrologica Slovaca*, 23 (2), 234–240. <https://doi.org/10.31577/ahs-2022-0023.02.0026>
- Krajewski, W.F., Ceynar, D., Demir, I., Goska, R., Kruger, A., Langel, C., Mantilla, R., Niemeier, J., Quintero, F., Seo, B.-C., Small, S.J., Weber, L.J., & Young N.C. (2017). Real-Time Flood Forecasting and Information System for the State of Iowa. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98 (3), 539–554. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00243.1>
- Lewis, E., Birkinshaw, S., Kilsby, C., & Fowler, H.J. (2018). Development of a system for automated setup of a physically-based, spatially-distributed hydrological model for catchments in Great Britain. *Environmental Modelling & Software*, 108, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.07.006>
- Loi, N.K., Liem, N.D., Tu, L.H., Hong, N.T., Truong, C.D., Tram, V.N.Q., Nhat, T.T., Anh, T.N., & Jeong, J. (2019). Automated procedure of real-time flood forecasting in Vu Gia — Thu Bon River basin, Vietnam by integrating SWAT and HEC-RAS models. *Journal of Water and Climate Change*, 10 (3), 535–545. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.015>
- Lukyanets, O.I., & Susidko, M.M. (2004). Integrated basin flood forecasting system in Transcarpathia: methodological and technological basis of its components. *Nauk. pratsi UkrNDGMI*, 253, 234–249. [in Ukrainian]
- Maslova, T.V., & Susidko, M.M. (2007). Estimating the humidity of mountain catchments in mathematical modeling of rain floods. *Nauk. pratsi UkrNDGMI*, 256, 233–238. [in Ukrainian]
- Moskalenko, S.O. (2013). Forecasting rain floods on the rivers of right bank of the Pripjat based on modeling of their formation processes. *Avtoref. dys. ... kand. geogr. nauk*: 11.00.07. Taras Shevchenko National University of Kyiv. [in Ukrainian]
- Petzold, C. (2002). Programming Microsoft Windows with C#. Microsoft Press.
- Prokopenko, O.V., Popov, M.O., & Chumak, H.L. (2024). Programming language C/C++. Workshop: a textbook. Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv. [in Ukrainian]
- Pryimachenko, N.V. (2010). Substantiation of the system for calculating flood characteristics on mountain rivers of the Dniester basin based on mathematical modeling of rain runoff formation processes. *Avtoref. dys. ... kand. geogr. nauk*: 11.00.07. Taras Shevchenko National University of Kyiv. [in Ukrainian]
- Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine. (2023). 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. Retrieved December 24, 2024 from <https://www.kmu.gov.ua/npasearch?&num=730&category=3> [in Ukrainian]
- Shakirzanova, Z.R. (2015). Long-term forecasting of the characteristics of the maximum spring flow of plain rivers and estuaries in Ukraine. Odesa: TOV "Plyton". [in Ukrainian]
- Shakirzanova, Z.R., Perevozchikov, I.M., & Shevchenko, O.P. (2023). Application of the method of territorial long-term forecasts to determine the maximum water discharge rates under the conditions of spring flood 2022–2023 formation across the Desna basin. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 31, 5–21. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.01> [in Ukrainian]
- Škerjanec, M. (2022). Automated catchment scale modelling of hydrological phenomena and water quality. *Acta hydro-technica*, 35/62, 1–18. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2022.01>
- Susidko, M.M. (2000). Mathematical modeling of runoff formation processes as a basis of forecasting systems. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 1, 32–40. [in Ukrainian]
- Susidko, M.M., Sherbak, A.V., Zelenska, M.V., & Danylchuk, V.I. (2007). Ice regime of plain rivers and reservoirs of Ukraine. System of short-term forecasting of its characteristics. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 13, 62–84. [in Ukrainian]
- Vishnevsky, V.I., Stashuk, V.A., & Sakevych, A.M. (2011). Water management complex in the Dnieper basin. Kyiv: Interpres LTD. [in Ukrainian]
- Water Fund of Ukraine. Artificial reservoirs. Reservoirs and ponds. (2014). In: V.K. Khilchevskiy, V.V. Grebin. Kyiv: Interpres LTD. [in Ukrainian]

Borys Khrystiuk

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

**PROCESS AUTOMATION OF THE LONG-TERM
FORECASTING OF ICE BREAK-UP AND ICE
DISAPPEARANCE DATES AT THE DNIPRO
RESERVOIRS**

The article is devoted to the creation of an automated system "Ice-Spring" for long-term forecasting of dates of ice break-up and ice disappearance at the Dnipro Cascade reservoirs by writing a computer program for its further use in the operative work of the Ukrainian Hydrometeorological Center of the State Emergency Service of Ukraine (UkrHMC). To automate the forecasting process, the "Ice-Spring" system software was created, which is written in the C# and C++ programming languages in the Visual Studio 2022 Community Edition environment in the view of Windows forms and console applications. The "Ice-Spring" system allows for long-term forecasting of the dates of

ice break-up (February 20) and ice disappearance (March 5) at the Dnipro Cascade reservoirs at 36 water gauges each year. Forecasting is carried out using 12 forecast dependencies based on regression relationships between dates on indicator water gauges and teleconnection indicators. In this case, the mean monthly values of 11 teleconnection indicators are used, which affect the processes of ice break-up and ice disappearance at the Dnipro Cascade reservoirs, which are determined by the National Weather Service (NWS) of the National Oceanic & Atmospheric Administration USA (NOAA). Forecasting on other water gauges is carried out using 60 regression dependencies between the dates at these gauges and the dates at the indicator water gauges. The created software for the automated long-term forecasting system "Ice-Spring" has successfully passed testing and has shown its performance for independent data for 2021. At the same time, carried out evaluation of forecasting efficiency has shown acceptable results, since of 12 forecasts, only 2 forecasts did not come true. The "Ice-Spring" system was transferred to the UkrHMC for testing and operative use.

Keywords: long-term forecasting, ice break-up, ice destruction, Dnipro reservoirs, prognostic dependencies, automated system.

