

Імовірнісні характеристики тривалості льодоставу на річках басейну Прип'яті в межах України

Л.О. Горбачова, О.О. Афтенюк, 2024

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України
та НАН України, Київ, Україна
Надійшла 10 січня 2024 р.

Льодостав, що утворюється на річках в осінньо-зимовий період, суттєво впливає на гідрологічні, гідрохімічні, біологічні процеси річок, а також на роботу гідроенергетики, судноплавства, рибного господарства тощо. У сучасних умовах формування, тривалість, руйнування льодоставу на річках відбуваються під впливом природних й антропогенних чинників та кліматичних змін. Дослідження сучасних тенденцій тривалості льодоставу річок та визначення його розрахункових характеристик є актуальним завданням. У статті визначено ймовірнісні характеристики, статистичні параметри тривалості льодоставу на річках басейну Прип'яті у межах України. Використано дані 29 гідрологічних постів за період від початку спостережень по 2020 р. включно. Як статистичні параметри аналітичного розподілу тривалості льодоставу річок використано середнє багаторічне значення, коефіцієнт варіації і коефіцієнт асиметрії, які розраховувались методом моментів. Розподіл Пірсона III типу використано для побудови аналітичних кривих, а формулу Вейбула — для емпіричного розподілу.

Ймовірнісний розподіл Пірсона III типу цілком задовільно описує емпіричні точки тривалості льодоставу на річках басейну Прип'яті у межах України. Переважна більшість аналітичних кривих розподілу тривалості льодоставу мають негативну асиметрію і тільки 8 — позитивну. Середня тривалість льодоставу в басейні Прип'яті становить 69 діб і коливається у межах від 26 до 95 діб. Коефіцієнти асиметрії невеликі і змінюються у межах від 0,01 до 1,02 для додатних значень і від $-0,03$ до $-0,60$ — для від'ємних. Коефіцієнти варіації змінюються у невеликих межах — від 0,34 до 0,79. Розраховані відносні середні квадратичні похибки статистичних параметрів аналітичних кривих розподілу тривалості льодоставу на річках є цілком прийнятними.

Ключові слова: льодостав, тривалість, ймовірнісні характеристики, басейн Прип'яті, статистичні параметри, розподіл Пірсона.

Вступ. Льодостав є одним із значущих видів льодових явищ на річках, оскільки його утворення призводить до формування суцільного нерухомого льодяного покриву, який суттєво впливає на гідрологічні, гідрохімічні, біологічні процеси річок [Prowse, 2005; Leppäranta, 2015; Хільчевський та ін., 2022]. Крім того, льодостав безпосередньо впливає на роботу гідротехнічних споруд, судноплавства, комуналь-

ного, рибного господарств тощо [Beltaos, Burrell, 2015].

Знання умов і строків утворення, руйнування та тривалості льодоставу на річках є дуже важливими як з практичної точки зору, так і наукової. Знання про характеристики льодоставу річок необхідні для проєктування, експлуатації будь-яких гідротехнічних споруд, а також роботи галузей господарства, що пов'язані з ви-

Citation: *Gorbachova, L.O., & Afteniuk, O.O. (2024). Probabilistic characteristics of the complete freezing duration on the rivers of the Prypiat basin with in Ukraine. Geofizychnyi Zhurnal, 46(3), 74–84. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i3.296302>.*

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

користанням річок [Beltaos, 1995; Gebre, Alfredsen, 2011; Das et al., 2018]. З наукового погляду такі знання дають можливість аналізувати тенденції, зміни, особливості просторового розподілу, умови формування льодоставу тощо [Magnuson et al., 2000; Stickler, Alfredsen, 2005; SolarSKI, Rzeżała, 2020; Gorbachova et al., 2023]. У сучасних умовах характеристики льодового режиму річок змінюються під впливом як природних, так і антропогенних чинників [Prowse, Beltaos, 2002; Вишневський, 2002; Klavins et al., 2009; Струтинська, Гребінь, 2010; Yang et al., 2020]. На формування льодового режиму річок, зокрема льодоставу, істотно впливають кліматичні зміни [Magnuson et al., 2000; SolarSKI, Rzeżała, 2020; Yang et al., 2020]. Отже, сучасні знання о характеристиках льодового режиму річок є дуже важливі. Разом з тим традиційно визначають такі показники льодового режиму річок як середня багаторічна дата, сама рання та пізня дати, а також середню, найменшу і найбільшу тривалість льодових явищ та льодоставу [Щербак та ін., 2007]. Хоча, безсумнівно, такі показники є важливими, але вони надають доволі обмежене уявлення про льодовий режим за деякий проміжок часу (період спостережень). Зазвичай навіть тривалі ряди спостережень можуть містити тільки один або два екстремальні випадки, а короткі ряди — жодного [WMO, 2009; Gorbachova et al., 2021]. Визначення ймовірнісних характеристик льодового режиму річок дає змогу розширити знання щодо їх мінливості, величин, строків настання основних фаз, тривалості [WMO, 2009; Gorbachova, Khrystyuk, 2012].

Дослідження льодового режиму водних об'єктів обумовлюються економічними, суспільними, екологічними, біологічними і кліматичними аспектами [Beltaos, 1995; Beltaos, Burrell, 2015; Magnuson et al., 2000; Yang et al., 2020]. Перші ґрунтовні дослідження льодового режиму річок України було виконано у 1960—1970-х роках. Саме у той період було визначено основні, а також ймовірнісні характеристики льодового режиму річок України. Подальші дослідження були спрямовані на вивчен-

ня просторово-часових закономірностей льодового режиму річок і виконувались переважно для окремих річкових басейнів і показників. Так, у статті [Вишневський, 2002] оцінено вплив кліматичних змін на льодовий режиму річок України, але дослідження виконано тільки на окремих постах спостережень. У публікації [Щербак та ін., 2007] для основних річок України досліджено часовий та просторовий розподіл дат появи льоду і встановлення льодоставу. Досліджено зміни характеристик термічного та льодового режимів річок басейну Дніпра залежно від температури повітря [Рахматуліна, Гребінь, 2010]. Дослідження тенденцій і змін льодового режиму річок басейну Південного Бугу досліджено у публікаціях [Рахматуліна, Гребінь, 2010; Горбачова, 2013], басейну Дунаю — [Gorbachova, Khrystyuk, 2012; Khrystyuk, Gorbachova, 2016], басейну Прип'яті — [Gorbachova et al., 2023]. Ймовірнісні характеристики тривалості льодоставу на річках України, зокрема, і для річок басейну Прип'яті, ніколи не визначали. Зауважимо, що у статті [Gorbachova, Khrystyuk, 2012] визначено ймовірнісні характеристики тривалості льодових явищ для дельти р. Дунай.

Метою роботи є визначення ймовірнісних характеристик тривалості льодоставу на річках басейну Прип'яті у межах України, а також аналіз отриманих результатів. Відповідно до поставленої мети у статті розглянуто такі *завдання*:

- визначення статистичних параметрів тривалості льодоставу, а саме середнього багаторічного значення, коефіцієнтів варіації і асиметрії;
- визначення аналітичних та емпіричних ймовірнісних характеристик тривалості льодоставу;
- побудова кривих аналітичного і емпіричного розподілів тривалості льодоставу;
- аналіз та обґрунтування отриманих результатів.

Матеріали та методи дослідження. У межах України протікає верхів'я р. Прип'ять (204 км від витоку), її правобережні притоки та останні 50 км до впадіння в Ки-

ївське водосховище (рис. 1) [Зузук та ін., 2010]. На території України довжина річки дорівнює 254 км, площа водозбірного басейну — 68 370 км². Загальний водозбір Прип'яті асиметричний, на правобережну частину припадає близько 2/3 всієї його площі [Вишневецький, Куций, 2022].

На річках басейну Прип'яті у межах території України середні багаторічні дані засвідчують, що встановлення льодоставу відбувається з грудня до початку січня, руйнування льодоставу — з лютого до середини березня [Gorbachova et al., 2023]. Зазвичай льодостав на річках може неодноразово перериватися внаслідок нестійкого температурного режиму повітря в осінньо-зимовий період [Щербак та ін., 2007]. Крім того, тривалість льодоставу на річках залежить не тільки від температури повітря, а й від індивідуальних особливос-

тей річки у пунктах спостережень. Так, ще в 1970-х роках Н.Г. Дюкель було показано, що формування і руйнування льодових явищ на річках України прямо залежать від водності річок та швидкості їхньої течії [Дюкель, 1975].

У басейні р. Прип'ять в межах України спостереження за характеристиками льодового режиму річок виконуються на 29 гідрологічних постах (див. рис. 1). Для дослідження тривалості льодоставу на річках використано дані з початку спостережень до 2020 р. включно (табл. 1), які містяться в опублікованих довідкових матеріалах, підготовлених Центральною геофізичною обсерваторією ім. Бориса Срезневського. Тривалість самого короткого ряду спостережень — 35 років (р. Устю—с. Корнин), самого довгого — 96 років (р. Случь — м. Новоград-Волинський).

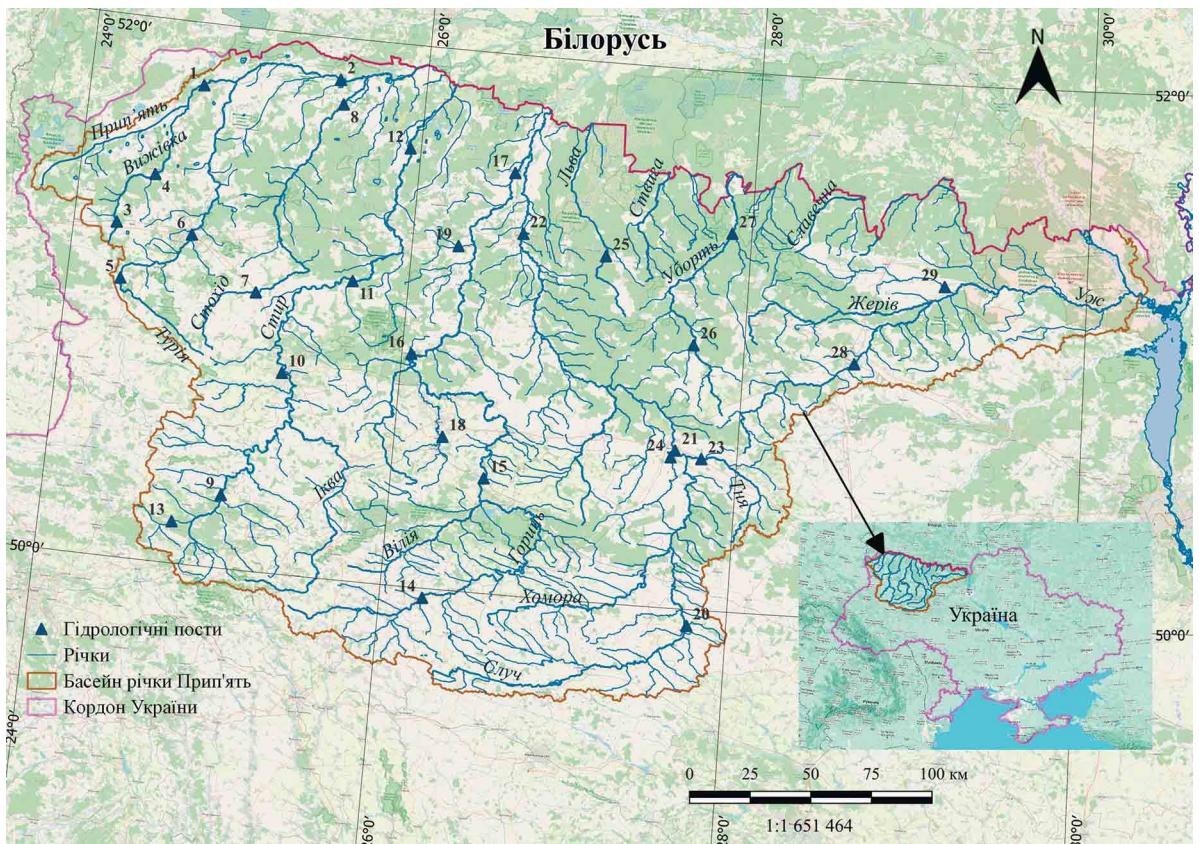


Рис. 1. Схема басейну р. Прип'ять у межах території України та 29 гідрологічних постів (нумерація відповідає нумерації табл. 1 фонові графіка від Open Street Map Україна, <https://openstreetmap.org.ua/>).

Fig. 1. Scheme of the Prypiat River basin within Ukraine and the 29 water gauges (the numbering of stations is based on Table 1 background graphic from Open Street Map Ukraine, <https://openstreetmap.org.ua/>).

Т а б л и ц я 1. Перелік гідрологічних постів у басейні р. Прип'ять у межах України

Річка	Пост	Площа водозбору, км ²	Період спостережень/його тривалість, роки
Прип'ять	с. Річиця	2210	1940—1941, 1946—2020/75
Прип'ять	с. Любязь	6100	1946—2020/74
Вижівка	с. Руда	141	1929—1933, 1945—2020/79
Вижівка	смт Стара Виживка	722	1944—2020/77
Турія	с. Ягідне	502	1939—1941, 1945—2020/77
Турія	м. Ковель	1480	1923—1934, 1939—1941, 1945—2020/87
Стохід	с. Малинівка	692	1940—1941, 1945—2020/76
Стохід	смт Любешів	2970	1923—1933, 1940—1941, 1945—2020/85
Стир	с. Щуровичі	2020	1939—1941, 1946—2020/76
Стир	м. Луцьк	7200	1923—1933, 1935—1941, 1944—2020/92
Стир	м. Колки	9050	1946—2020/74
Стир	с. Млинок	10900	1929—1941, 1946—1956, 1959—2020/83
Радоставка	с. Трійця	316	1945—2020/75
Горинь	смт Ямпіль	1400	1936—1941, 1943—2020/82
Горинь	с. Оженін	5860	1939—1941, 1945—2020/77
Горинь	с. Деражне	9160	1939—1942, 1946—2020/77
Горинь	м. Дубровиця	12000	1935—2020/85
Устя	с. Корнин	485	1985—2020/35
Вирка	с. Сварині	231	1946—2020/74
Случь	с. Громада	2480	1926—1927, 1930—1941, 1945—2020/86
Случь	м. Новоград-Волинський	7460	1924—2020/96
Случь	м. Сарни	13300	1945—2020/75
Тня	с. Бронники	982	1936—1941, 1943, 1945—2020/81
Смілка	с. Сусли	632	1939—1941, 1944—2020/78
Льва	с. Осницьк	276	1946—2020/74
Уборть	с. Рудня-Іванівська	776	1927—1941, 1945—2020/89
Уборть	с. Перга	2880	1924—1941, 1946—2020/91
Уж	м. Коростень	1450	1930—1941, 1944—2020/87
Норин	с. Словенщина	804	1963—2020/57

Визначення розрахункових імовірнісних характеристик тривалості льодоставу на річках басейну Прип'яті в межах території України різної ймовірності перевищення виконано за методичними підходами, які викладено у керівництві [WMO, 2009]. Так, аналіз однорідності і стаціонарності рядів спостережень за тривалістю льодоставу на річках попередньо виконано у статті [Gorbachova et al., 2023] за статистичними (метод Пірсона, непараметричний критерій Манна—Кендалла) і графічними методами (сумарна крива, ін-

тегральна крива відхилень, суміщені графіки). Показано, що ряди спостережень за тривалістю льодоставу на річках басейну Прип'яті в межах території України виявилися однорідними (квазіоднорідними) і стаціонарними (квазістаціонарними). Отже, стаціонарність (квазістаціонарність) рядів спостережень вказує на їх репрезентативність, тобто наявність фази підвищення і фази зниження довготривалих циклічних коливань тривалості льодоставу на річках басейну Прип'яті. Крім того, наявність репрезентативного періоду в ряді спостере-

жень вказує, що з часом його середнє значення не змінюється. Це дає можливість визначати розрахункові характеристики тривалості льодоставу річок різної ймовірності перевищення. Статистичні параметри аналітичних кривих, а саме середнє багаторічне значення, коефіцієнти варіації і асиметрії розраховано методом моментів. Для апроксимації емпіричних точок тривалості льодоставу використано аналітичний розподіл Пірсона III типу. Емпіричний розподіл визначено за формулою Вейбула. Аналіз достатності тривалості рядів спостережень виконано за розрахованими відносними середніми квадратичними похибками визначення їхніх середніх значень і коефіцієнтів варіації.

Результати. На річках басейну Прип'яті в межах території України середня тривалість льодоставу становить 69 діб, найбільше її значення — 88 діб, спостерігалось на гідрологічних постах р. Вижівка—с. Руда та р. Уборть—с. Рудня-Іванівська, а найменше значення — 26 діб на посту р. Устя—с. Корнин (табл. 2).

Переважає більшість аналітичних кривих розподілу тривалості льодоставу на річках басейну Прип'яті мають негативну від'ємну асиметрію, тобто спостерігається несиметричність рядів відносно середніх значень на більші значення тривалості льодоставу (табл. 2, рис. 2). Водночас винятком є аналітичні криві на восьми гідрологічних постах, які мають додатну асиметрію. На цих постах середня тривалість льодоставу найменша, оскільки від 1970-х років спостерігається збільшення кількості зим, у які льодостав не утворюється, тобто має нульову тривалість.

Це пояснюється як індивідуальними особливостями формування льодоставу на цих постах, так і загальною тенденцією до збільшення кількості відносно м'яких зим, що приводить до збільшення кількості випадків порушення суцільного льодоставу на інших постах унаслідок нестійкого температурного режиму в зимовий період [Щербак та ін., 2007]. Крім того, у статті [Gorbachova et al., 2023] показано, що з 2002 р. у грудні фаза потепління темпера-

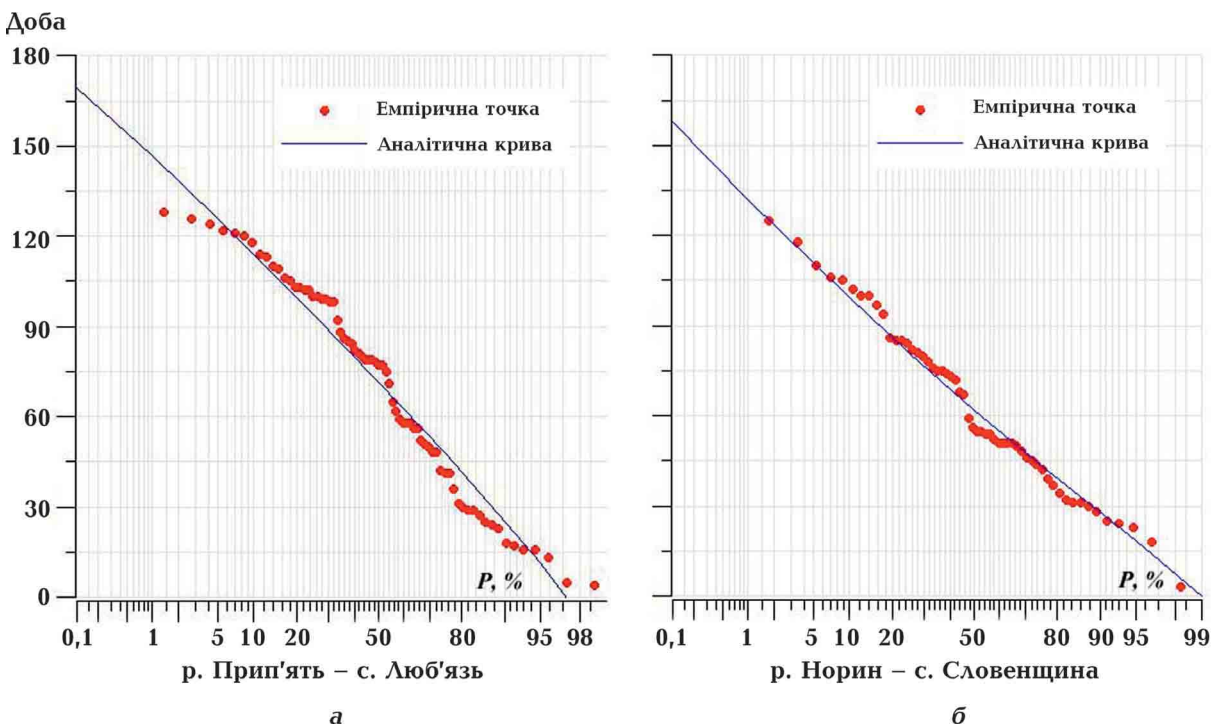


Рис. 2. Приклад кривих імовірнісного розподілу тривалості льодоставу на річках басейну Прип'яті.

Fig. 2. An example of the curves of probability distribution of freeze-up duration on the rivers of the Pripet basin.

Таблиця 2. Імовірнісні характеристики тривалості льодоставу на річках басейну Прип'яті у межах території України

Номер	Річка—пост	Забезпеченість, P , %					Параметри		
		1	5	50	75	95	$\frac{T_{\text{серед}}}{\delta_{\text{серед}}}$	$\frac{C_v}{\delta_{C_v}}$	C_s
1	р. Прип'ять—с. Річиця	147	126	77,2	57,1	28,2	$\frac{77}{4,50}$	$\frac{0,39}{8,76}$	-0,20
2	р. Прип'ять—с. Любязь	147	126	71,4	47,7	11,3	$\frac{70}{5,70}$	$\frac{0,49}{9,15}$	-0,18
3	р. Вижівка—с. Руда	163	141	88,4	66,6	35,3	$\frac{88}{4,05}$	$\frac{0,36}{8,46}$	-0,33
4	р. Вижівка—сміт Стара Вижівка	158	137	85,6	64,6	34,3	$\frac{86}{4,10}$	$\frac{0,36}{8,56}$	-0,41
5	р. Турія—с. Ягідне	141	122	74,4	55,1	27,2	$\frac{74}{4,44}$	$\frac{0,39}{8,65}$	-0,29
6	р. Турія—м. Ковель	151	131	77,3	51,8	11,3	$\frac{75}{5,25}$	$\frac{0,49}{8,44}$	-0,36
7	р. Стохід—с. Малинівка	153	133	80,3	57,2	21,2	$\frac{79}{4,93}$	$\frac{0,43}{8,83}$	-0,22
8	р. Стохід—м. Любешів	140	124	79,0	57,9	24,7	$\frac{77}{4,23}$	$\frac{0,39}{8,23}$	-0,33
9	р. Стир—с. Щуровичі	111	81,8	29,2	14,7	0,21	$\frac{33}{8,83}$	$\frac{0,77}{10,2}$	1,02
10	р. Стир—м. Луцьк	124	104	56,6	37,1	9,08	$\frac{57}{5,32}$	$\frac{0,51}{8,28}$	0,28
11	р. Стир—сміт Колки	128	108	60,1	40,4	11,9	$\frac{60}{5,70}$	$\frac{0,49}{9,15}$	0,01
12	р. Стир—с. Млинок	136	117	69,4	50,1	2,58	$\frac{69}{4,50}$	$\frac{0,41}{8,39}$	-0,20
13	р. Радоставка—с. Трійця	137	110	54,9	36,7	14,8	$\frac{58}{5,89}$	$\frac{0,51}{9,17}$	0,55
14	р. Горинь—сміт Ямпіль	128	99,7	43,6	25,3	3,82	$\frac{47}{6,96}$	$\frac{0,63}{9,23}$	0,60
15	р. Горинь—с. Оженін	140	119	67,6	46,6	16,3	$\frac{68}{5,24}$	$\frac{0,46}{8,87}$	-0,12
16	р. Горинь—с. Деражне	124	97,6	42,6	23,6	0,08	$\frac{45}{7,52}$	$\frac{0,66}{9,66}$	0,45
17	р. Горинь—м. Дубровиця	132	118	77,1	57,2	25,5	$\frac{75}{4,12}$	$\frac{0,38}{8,20}$	-0,41
18	р. Устя—с. Корнін	86,6	63,6	22,4	10,9	0,05	$\frac{26}{13,4}$	$\frac{0,79}{15,2}$	1,00
19	р. Вирка—с. Сварині	140	119	68,3	47,6	17,3	$\frac{68}{5,23}$	$\frac{0,45}{9,01}$	-0,03
20	р. Случь—с. Громада	142	121	66,9	42,8	5,49	$\frac{66}{5,82}$	$\frac{0,54}{8,67}$	-0,22
21	р. Случь—м. Новоград-Волинський	153	133	84,6	64,7	36,0	$\frac{85}{3,57}$	$\frac{0,35}{7,65}$	-0,43
22	р. Случь—м. Сарни	150	130	82,3	62,7	34,4	$\frac{82}{4,04}$	$\frac{0,35}{8,65}$	-0,32
23	р. Тня—с. Бронники	159	137	82,5	60,2	28,2	$\frac{82}{4,44}$	$\frac{0,40}{8,46}$	-0,29
24	р. Смілка—с. Сусли	169	142	75,6	48,6	9,73	$\frac{76}{6,00}$	$\frac{0,53}{9,06}$	-0,45
25	р. Льва—с. Осницьк	142	118	61,1	37,6	3,92	$\frac{61}{6,63}$	$\frac{0,57}{9,46}$	-0,06
26	р. Уборть—с. Рудня-Іванівська	157	137	87,6	67,5	38,6	$\frac{88}{3,60}$	$\frac{0,34}{7,92}$	-0,60
27	р. Уборть—с. Перга	158	136	81,3	59,0	26,9	$\frac{81}{4,30}$	$\frac{0,41}{8,01}$	-0,34
28	р. Уж—м. Коростень	132	108	53,9	32,8	3,86	$\frac{55}{6,22}$	$\frac{0,58}{8,76}$	0,15
29	р. Норинь—с. Словенщина	132	111	62,0	43,4	18,4	$\frac{63}{5,96}$	$\frac{0,45}{10,3}$	0,20

Примітка: $T_{\text{серед}}$ — середня тривалість льодоставу за багаторічний період, який для кожного гідрологічного поста наведено у табл. 1, доба; $\delta_{\text{серед}}$ — відносна середня квадратична похибка визначення середньої тривалості льодоставу, %; C_v — коефіцієнт варіації; δ_{C_v} — відносна середня квадратична похибка визначення коефіцієнта варіації, %; C_s — коефіцієнт асиметрії.

тури повітря приводить до того, що льодостав встановлюється на річках у більш пізні строки, а у березні після 1988 р. фаза потепління температури повітря обумовлює руйнування льодоставу у більш ранні строки. Все це приводить до скорочення тривалості льодоставу на річках після 1988 р. (фаза зниження) (рис. 3).

Коефіцієнти асиметрії невеликі і змінюються у межах від 0,01 до 1,02 для додатних значень і від $-0,03$ до $-0,60$ для від'ємних значень. Коефіцієнти варіації змінюються

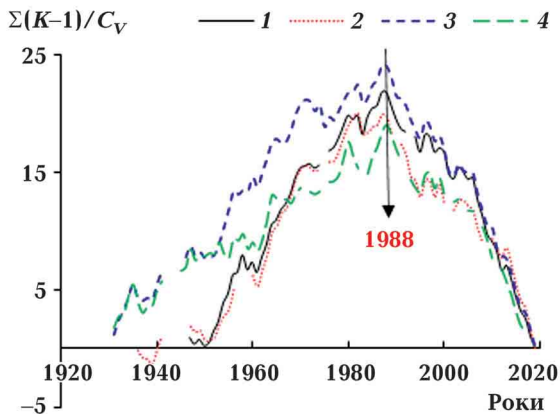


Рис. 3. Приклад інтегральних кривих відхилень тривалості льодоставу на річках басейну Прип'яті: 1 — р. Прип'ять—с. Любязь; 2 — р. Стир—с. Млинок; 3 — р. Случь—с. Громада; 4 — р. Уж—м. Коростень [Gorbachova et al., 2023].

Fig. 3. An example of the residual mass curves of freeze-up duration on the rivers of the Pripyat basin: 1 — Pripyat River—Liubiaz village; 2 — Styr River—Mlynok village; 3 — Sluch River—Hromada village; 4 — Uzh River—Korosten city [Gorbachova et al., 2023].

у невеликих межах від 0,34 до 0,79.

Аналітичні криві розподілу Пірсона III типу цілком задовільно описують емпіричний розподіл тривалості льодоставу на річках басейну Прип'яті (див. рис. 2). Найбільші відхилення емпіричних точок від аналітичної кривої спостерігаються для ймовірностей, які не часто повторюються, тобто характеризують екстремальні події, а саме найбільшу і найменшу тривалість льодоставу на річках. Зазначимо, що найбільші труднощі з побудовою аналітичних кривих виникають для постів, що мають декілька років з нульовою тривалістю.

Однак труднощі з підбором аналітичних кривих розподілу виникають і для інших гідрологічних характеристик, особливо для тих, що мають короткі ряди спостережень, одне екстремальне значення або дуже асиметричний розподіл [WMO, 2009; Gorbachova et al., 2021]. Разом з тим, розраховані відносні середні квадратичні похибки визначення середніх значень рядів тривалості льодоставу не перевищує 10 %, а відносні середні квадратичні похибки визначення коефіцієнтів варіації — 15 % (див. табл. 2). Винятком є тільки ряд на гідрологічному посту р. Устя—с. Корнін, тривалість якого дорівнює 35 рокам. На всіх інших 28 гідрологічних постах тривалість рядів є достатньою для визначення ймовірнісних характеристик тривалості льодоставу на річках басейну Прип'яті.

Висновки. Для річок басейну Прип'яті за даними 29 гідрологічних постів за період від початку спостережень по 2020 р. включно розраховано статистичні параметри та визначено ймовірнісні характеристики тривалості льодоставу. Середня тривалість льодоставу по басейну Прип'яті становить 69 дб і коливається у межах від 26 до 88 дб. Імовірнісний розподіл Пірсона III типу цілком задовільно описує емпіричні точки тривалості льодоставу на річках. Переважна більшість аналітичних кривих розподілу тривалості льодоставу мають негативну асиметрію. Винятком є аналітичні криві на восьми гідрологічних постах, що мають найменшу середню тривалість льодоставу, яка обумовлена індивідуальними особливостями формування льодоставу на цих постах і нестійким температурним режимом у зимовий період. Значення коефіцієнтів асиметрії невеликі і змінюються у межах від 0,01 до 1,02 для додатних значень і від $-0,03$ до $-0,60$ для від'ємних значень. Коефіцієнти варіації змінюються у невеликих межах від 0,34 до 0,79. Розраховані відносні середні квадратичні похибки статистичних параметрів аналітичних кривих розподілу тривалості льодоставу на річках є цілком прийнятними.

Отримані результати, а саме ймовірнісні характеристики і статистичні параметри

тривалості льодоставу річок можна використати для подальших досліджень — по-

шуку прогностичних залежностей, просторового узагальнення, районування тощо.

Список літератури

- Вишневецький В.І. Вплив кліматичних змін і господарської діяльності на термічний і льодовий режими річок. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2002. Вип. 250. С. 121—137.
- Вишневецький В.І., Куций А.В. *Багаторічні зміни водного режиму річок України*. Київ: Наук. думка, 2022, 252 с.
- Горбачова Л.О. Багаторічна динаміка льодових явищ в басейні річки Південний Буг. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2013. Т. 3. С. 21—27.
- Дюкель Н.Г. Вероятностное распределение дат начала устойчивого ледостава на средних и малых реках Украины. *Труды УкрНИГМИ*. 1975. Вып. 145. С. 74—90.
- Зузок Ф.В., Колошко Л.К., Карпюк З.К., Димшиц О.Л. Долина р. Прип'яті як складова частина структури Української екологічної мережі на території Волинської області. *Науковий вісник Волинського національного університету імені Лесі Українки, серія «Географія»*. 2010. № 17. С. 18—31.
- Рахматуліна Е.Р., Гребінь В.В. Оцінка сучасного льодового режиму басейну річки Південний Буг. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2010. Т. 3. С. 89—94.
- Струтинська В.М., Гребінь В.В. *Термічний та льодовий режими річок басейн у Дніпра з другої половини ХХ століття*. Київ: Ніка-Центр, 2010, 196 с.
- Щербак А.В., Зеленська М.В., Гайдай Ю.М. Льодовий режим річок України (льодоутворення та його характеристики). *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2007. Вип. 256. С. 214—222.
- Хільчевський В.К. Гребінь В.В., Манукало В.О. *Гідрологічний словник*. Київ: ДІА, 2022. 236 с.
- Beltaos, S. (1995). *River ice jams*. Water Resources Publications: Highlands Ranch, Colorado, 390 p.
- Beltaos, S., & Burrell, B. (2015). Hydrotechnical advances in Canadian river ice science and engineering during the past 35 years. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(9), 583—591. <https://doi.org/10.1139/cjce-2014-0540>.
- Das, A., Reed, M., & Lindenschmidt, K.-E. (2018). Sustainable ice-jam flood Management for Socio-Economic and Socio-Ecological Systems. *Water*, 10(2), ID 135. <https://doi.org/10.3390/w10020135>.
- Gebre, S.B., & Alfredsen, K.T. (2011). Investigation of river ice regimes in some Norwegian water courses years. *16th Workshop on River Ice Winnipeg, Manitoba, September 18—22, 2011*. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment.
- Gorbachova, L., Afteniuk, O., Khrystiuk, B., & Lobodzynski, O. (2023). Trends and fluctuations of river ice regimes in the Prypiat Basin, within Ukraine. *Meteorology Hydrology and Water Management. Research and Operational Applications*, 11(1), 62—75. <https://doi.org/10.26491/mhwm/166632>.
- Gorbachova, L., & Khrystiuk, B. (2012). The dynamics and probabilistic characteristics of the ice phenomena of the Danube River and its Kiliysky channel. *Conference Proc. «Water resource and wetlands», 14—16 September, Tulcea, Romania* (pp. 319—324). Retrieved from <http://www.limnology.ro/water2012/Proceedings/048.pdf>.
- Gorbachova, L., Prykhodkina, V., & Khrystiuk, B. (2021). Spring flood frequency analysis in the Southern Buh River Basin, Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30(2), 250—260. <https://doi.org/10.15421/11213501>.
- Klavins, M., Briede, A., Rodinov, V. (2009). Long-term changes in ice and discharge regime of rivers in the Baltic region in relation to climatic variability. *Climatic Change*, 95, 485—498. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9567-5>.
- Khrystiuk, B., & Gorbachova, L. (2016). The ice regime of the rivers within Zaccarpatska water-balance station. *Book of Abstracts of the 16th Biennial Conf. of the Euromediterranean network of Experimental and Representative Basins «Hydrological behaviour in small basins*

- under changing conditions», 5–8 September 2016, Bucharest, Romania (P. 22).*
- Leppäranta, M. (2015). *Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover*. Springer Science and Business Media. Berlin, 301 p.
- Magnuson, J.J., Robertson, D., Benson, B., Wynne, R.H., Livingstone, D.M., Arai, T., Assel, R.A., Barry, R.G., Card, V., Kuusisto, E., Granin, N.G., Prowse, T.D., Stewart, K.M., Vuglinski, V.S. (2000). Historical trends in lake and river ice cover in the northern hemisphere. *Science*, 289, 1743–1746. <https://doi.org/10.1126/science.289.5485.1743>.
- Prowse, T.D. (2005). *River-ice hydrology*. In Anderson M.G. (Ed.), *Encyclopedia of hydrological sciences* (Vol. 4, pp. 2657–2677). Chichester: John Wiley & Sons.
- Prowse, T.D., & Beltaos, S. (2002). Climatic control of river-ice hydrology: a review. *Hydrological Processes*, 16(4), 805–822. <https://doi.org/10.1002/hyp.369>.
- Solarski, M., & Rzętała, M. (2020). Ice Regime of the Kozłowa Góra Reservoir (Southern Poland) as an Indicator of Changes of the Thermal Conditions of Ambient Air *Water*, 12, ID 2435. <https://doi.org/10.3390/w12092435>.
- Stickler, M.K., & Alfredsen, K. (2005). Factors controlling anchor ice formation in two Norwegian rivers. *CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, 13th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Hanover, NH, September 15–16, 2005*. Retrieved from <https://www.academia.edu/15253245>.
- Yang, X., Pavelsky, T.M., & Allen, G.H. (2020). The past and future of global river ice. *Nature*, 577, 69–73. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1848-1>.
- 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.

Probabilistic characteristics of the complete freezing duration on the rivers of the Prypiat basin with in Ukraine

L. Gorbachova, O. Afteniuk, 2024

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

The complete freezing of rivers in the autumn-winter period significantly impacts the hydrological, hydrochemical, biological processes and the work of hydropower plants, shipping, fisheries, etc. In modern conditions, the formation, duration, and break-up of the freeze-up on rivers occurs under the influence of natural, anthropogenic factors and climatic changes. Therefore, studying modern trends of the freeze-up duration on the river and calculating its characteristics are urgent tasks. Traditionally, the multi-annual mean, minimum and maximum values of the freeze-up duration on rivers are determined. Such indicators are important, but they still provide a rather limited knowledge about the freeze-up over a period of time. More knowledge about the variability, magnitudes, duration, dates of freezing and breaking can be gained from determining its probabilistic characteristics, but such research has not been done for the rivers of Ukraine, including the Prypiat basin.

The paper aims to determine the probabilistic characteristics of the freeze-up duration of the rivers of the Prypiat basin within Ukraine.

The data of 29 water gauges were used for the period from the beginning of observations to 2020, inclusive. For the analytical distribution of the freeze-up duration, the multi-annual mean value, the coefficient of variation and the coefficient of asymmetry were used. The Pearson distribution of type III was used to create analytical curves of the

freeze-up duration, and the Weibull formula was used for the empirical distribution of the freeze-up duration.

The Pearson type III probability distribution quite satisfactorily describes the empirical points of the freeze-up duration on the rivers of the Prypiat basin within Ukraine. The vast majority of the analytical curves of the distribution of the freeze-up duration have negative asymmetry. Only 8 the analytical curves have positive asymmetry. In the Prypiat Basin within Ukraine, the multi-annual mean of the freeze-up duration is 69 days and ranges from 26 to 88 days. The values of the asymmetry coefficients are small and vary from 0.01 to 1.02 for positive values and from -0.03 to -0.60 for negative values. The coefficients of variation change within a small range (from 0.34 to 0.79).

Probabilistic characteristics can be used for the design and operation of any hydro-technical structures, as well as the work of economic sectors that are related to the use the rivers. In addition, our results can be used for further research, namely a search for prognostic dependencies, generalizations, zoning, etc.

Key words: freeze-up, duration, probabilistic characteristics, Prypiat Basin, statistical parameters, Pearson distribution.

References

- Vishnevskiy, V.I. (2002). The influence of climatic changes and economic activity on the thermal and ice regimes of rivers. *Proc. of the Ukrainian Hydrometeorological Institute*, (250), 121—137 (in Ukrainian).
- Vyshnevskiy, V.I. & Kutsiy, A.V. (2022). *Long-term changes in the water regime of rivers in Ukraine*. Kyiv: Naukova dumka, 252 p. (in Ukrainian).
- Gorbachova, L. (2013). *Long-term dynamics of ice phenomena in the basin of the Southern Bug River. Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 3, 21—27 (in Ukrainian).
- Dukel, N.G. (1975). Probability distribution of the beginning dates of stable freeze-up on medium and small rivers of Ukraine. *Proc. of Ukrainian Hydrometeorological Institute*, (145), 74—90 (in Russian).
- Zuzuk, F.V., Koloshko, L.K., Karpiuk, Z.K. & Dymshyts, O.L. (2010). The valley of the Prypiat River as a component of the structure of the Ukrainian ecological network on the territory of the Volyn region. *Scientific Bulletin of Lesya Ukrainka Volyn National University, «Geography» series*, (17), 18—31. (in Ukrainian).
- Rachmatullina, E. & Grebin, V. (2010). Assessment of the modern ice regime of the Southern Bug River basin. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 3, 89—94 (in Ukrainian).
- Strutynska, V.M. & Grebin, V.V. (2010). *Thermal and ice regimes of the rivers of the Dnipro basin since the second half of the 20th century*. Kyiv: Nika-Center, 196 p. (in Ukrainian).
- Scherbak, A.V., Zelenska, M.V., & Haidai, Yu.M. (2007). *The ice regime of Ukraine rivers (freeze-up formation and its characteristics)*. *Proc. of Ukrainian Hydrometeorological Institute*, (256), 214—222 (in Ukrainian).
- Khilchevskiy, V.K., Grebin, V.V. & Manukalo, V.O. (2022). *Hydrological Dictionary*. Kyiv: DIA, 236 p. (in Ukrainian).
- Beltaos, S. (1995). *River ice jams*. Water Resources Publications: Highlands Ranch, Colorado, 390 p.
- Beltaos, S., & Burrell, B. (2015). Hydrotechnical advances in Canadian river ice science and engineering during the past 35 years. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(9), 583—591. <https://doi.org/10.1139/cjce-2014-0540>.
- Das, A., Reed, M., & Lindenschmidt, K.-E. (2018). Sustainable ice-jam flood Management for Socio-Economic and Socio-Ecological Systems. *Water*, 10(2), ID 135. <https://doi.org/10.3390/w10020135>.
- Gebre, S.B., & Alfredsen, K.T. (2011). Investigation of river ice regimes in some Norwegian water courses years. *16th Workshop on River Ice Winnipeg, Manitoba, September 18—22, 2011*. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment.
- Gorbachova, L., Afteniuk, O., Khrystiuk, B., & Lobodzynskiy, O. (2023). Trends and fluctuations of river ice regimes in the Prypiat Basin, within Ukraine. *Meteorology Hydrology and Water Management. Research and Operational Appli-*

- cations*, 11(1), 62—75. <https://doi.org/10.26491/mhwm/166632>.
- Gorbachova, L., & Khrystyuk, B. (2012). The dynamics and probabilistic characteristics of the ice phenomena of the Danube River and its Kiliysky channel. *Conference Proc. «Water resource and wetlands», 14—16 September, Tulcea, Romania* (pp. 319—324). Retrieved from <http://www.limnology.ro/water2012/Proceedings/048.pdf>.
- Gorbachova, L., Prykhodkina, V., & Khrystiuk, B. (2021). Spring flood frequency analysis in the Southern Buh River Basin, Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30(2), 250—260. <https://doi.org/10.15421/11213501>.
- Klavins, M., Briede, A., & Rodinov, V. (2009). Long-term changes in ice and discharge regime of rivers in the Baltic region in relation to climatic variability. *Climatic Change*, 95, 485—498. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9567-5>.
- Khrystyuk, B., & Gorbachova, L. (2016). The ice regime of the rivers within Zaccarpatska water-balance station. *Book of Abstracts of the 16th Biennial Conf. of the Euromediterranean network of Experimental and Representative Basins «Hydrological behaviour in small basins under changing conditions», 5—8 September 2016, Bucharest, Romania* (P. 22).
- Leppäranta, M. (2015). *Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover*. Springer Science and Business Media. Berlin, 301 p.
- Magnuson, J.J., Robertson, D., Benson, B., Wynne, R.H., Livingstone, D.M., Arai, T., Assel, R.A., Barry, R.G., Card, V., Kuusisto, E., Granin, N.G., Prowse, T.D., Stewart, K.M., & Vuglinski, V.S. (2000). Historical trends in lake and river ice cover in the northern hemisphere. *Science*, 289, 1743—1746. <https://doi.org/10.1126/science.289.5485.1743>.
- Prowse, T.D. (2005). *River-ice hydrology*. In Anderson M.G. (Ed.), *Encyclopedia of hydrological sciences* (Vol. 4, pp. 2657—2677). Chichester: John Wiley & Sons.
- Prowse, T.D., & Beltaos, S. (2002). Climatic control of river-ice hydrology: a review. *Hydrological Processes*, 16(4), 805—822. <https://doi.org/10.1002/hyp.369>.
- Solarski, M., & Rzętała, M. (2020). Ice Regime of the Kozłowa Góra Reservoir (Southern Poland) as an Indicator of Changes of the Thermal Conditions of Ambient Air *Water*, 12, ID 2435. <https://doi.org/10.3390/w12092435>.
- Stickler, M.K., & Alfredsen, K. (2005). Factors controlling anchor ice formation in two Norwegian rivers. *CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, 13th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Hanover, NH, September 15—16, 2005*. Retrieved from <https://www.academia.edu/15253245>.
- Yang, X., Pavelsky, T.M., & Allen, G.H. (2020). The past and future of global river ice. *Nature*, 577, 69—73. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1848-1>.
- 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.