

Water and salt balances of Katlabukh Lake under different conditions of water reservoir operation

Romanova Y.A., Shakirzanova ZH.R., Gopchenko E. D., Medvedieva I.S.

Katlabukh Lake is a part of the Danube Lakes system and is one of the surface water sources for water supply, for agricultural needs and irrigation of the region. Changing the conditions of operation and regulation of the reservoir led to a decrease of water levels and an increase of salinity, which makes it impossible to use water for different management needs.

Calculations of the water and salt regimes of the lake based on the solution of the equation of balance said that in the water balance of Katlabukh Lake the main volume of the revenue part for the period 1980-2018 was precipitation (36.1%) and water inflow from the Danube River (38%), and the expenditure part - evaporation together with transpiration (50.5%). Salt flow into the lake is mainly due to surface inflow (53.4%) and water of the Danube River (25.5%), and loss of irrigation (45.1%) and water discharges to the Danube River (31.9%).

Simulation modeling of the water-salt regime of the Katlabukh lake under different conditions of exploitation of the reservoir showed that corrective management measures are needed to improve the qualitative indicators of the water in the reservoir. They consist in the fact that for three summer months it is necessary to carry out forced pumping of poorly mineralized water from the Danube River to compensate for evaporation from the water surface (on average in volumes of the order of 55 million m³) or to carry out fences of water from the lake for irrigation in 60 million m³. This will allow to reach the design values of water mineralization in the lake equal to 1.0-1.5 g/dm³.

Thus, addressing a range of problems to conserve and restore the rational use of the natural resources of Katlabukh Lake requires effective managerial water management activities that require additional feasibility studies.

Key words: water and salt balances, mineralization, Katlabuh Lake, simulation modelling, rational use.

Надійшла до редколегії 17.09.2019

УДК: 556.512

Чорноморець Ю.О., Лук'янець О.І.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ВПЛИВ СУЧАСНИХ ЗМІН У СПІВВІДНОШЕННІ СНІГО-ДОЩОВОГО ЖИВЛЕННЯ РІЧОК НА СТРУКТУРУ ВОДНОГО БАЛАНСУ ЇХ БАСЕЙНІВ (НА ПРИКЛАДІ РІЧКОВОГО БАСЕЙНУ ВОРСКЛИ)

Ключові слова: басейн р. Ворскла, водний баланс, атмосферні опади, стік води, сумарне випаровування, кліматичні зміни, сніго-дощове співвідношення живлення річок.

Вступ. Гідрологічний цикл являє собою безперервний процес переміщення водних мас під впливом цілого ряду фізичних сил, дія яких проявляється у різноманітних процесах формування та руху природних вод: випаровування вологи з поверхні океанів та суші, випадінні атмосферних опадів, стіканні їх частини поверхневим та підземним шляхом тощо. Однією з кількісних характеристик гідрологічного циклу є водний баланс певної території за визначений інтервал часу, що відображає об'єктивно існуючі в природі співвідношення між надходженням, витрачанням та зміною запасів вологи. Формування водного балансу здійснюється під впливом різноманітних факторів, що діють в атмосфері, на поверхні ґрунту та в приповерхневій товщі ґрунту [2].

Основною прихідною частиною водного балансу є атмосферні опади, оскільки саме їх кількість і перерозподіл в часі та просторі визначають як особливості формування річкового стоку так і величину випаровування. В загальному випадку, опади поділяються на рідкі і тверді. Саме агрегатний стан, у якому опади надходять на водозбір, переважно є визначальним для процесів формування стоку зимової межени та весняного водопілля річок. З іншого боку, форма випадіння опадів

ISSN:2306-5680 **Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolohiia. 2019. № 4 (55)**

являється важливим індикатором, за яким можна оцінювати локальні прояви глобальних змін клімату, адже на зростання температури повітря в першу чергу реагують саме сніговий покрив та льодові явища на водних об'єктах. Так, у звіті IPCC [18] серед іншого йдеться про те, що в багатьох регіонах Землі опади, особливо танення снігу та льоду, викликають суттєві зміни в гідрологічних системах.

У статті наводяться результати обчислення снігової та дощової складових від загальної кількості атмосферних опадів, що приймають участь у формуванні водного балансу басейну річки Ворскла за матеріалами спостережень Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського на чотирьох метеорологічних станціях та трьох гідрологічних постах (рис.1) для спільного періоду 1961-2015 рр., а також описується їх багаторічна динаміка та вплив на формування річкового стоку холодного періоду року і загальну структуру водного балансу.



Рис. 1. Схема розташування пунктів спостереження, за даними яких обчислено водний баланс річок басейну Ворскли

логічних характеристик сучасного періоду (1991-2015) з періодом кліматичної норми(1961-1990). У відповідності з Технічним регламентом ВМО [19], кліматична норма певного елементу визначається як середнє значення протягом послідовних періодів по 30 років. На 17 Всесвітньому метеорологічному конгресі, що проходив у червні-травні 2015 року [17] було вирішено зберегти подібний підхід до питань моніторингу клімату та інших дослідницьких цілей.

У попередній роботі [5] був обчислений узагальнений водний баланс за даними гідрологічного поста Кобеляки для періоду 1961-2012 рр., та зафіксоване зниження кількості опадів зимового сезону з відповідним їх зростання у березні. Саме ці процеси призвели до змін параметрів весняного водопілля, тому дана робота покликана більш детально розглянути відмінності в надходженні різних за агрегатним станом атмосферних опадів до басейну р. Ворскла та впливу на її

Аналіз попередніх досліджень та постановка завдання. У роботі [15] з посиланням на цілу групу попередніх досліджень [6-7, 9, 11-14, 16] стверджується, що вплив змін клімату на річки зі сніговим живленням характеризується збільшенням дощової та зниженням снігової частки опадів, а також більш раннім початком водопілля. Для з'ясування наявності подібного ефекту в межах території України та для оцінювання умов формування стоку води річки Ворскла, в даній роботі наводиться методика поділу опадів за агрегатним станом та обчислення частки опадів у вигляді снігу від загальної кількості опадів. Серед наукових робіт українських гідрологів, питання багаторічних змін різних за походженням складових прихідної частини водного балансу поки що вивчені не досить докладно, що і обумовлює актуальність даної роботи.

З метою виявлення змін, які вже відбулися з водними об'єктами, проведемо порівняння гідрометеоро-

гідрологічний режим. Попередні відомості про водний баланс річки Ворскла наведені в довідниках [3-4].

Методологія дослідження. Водний баланс будь-якої ділянки земної поверхні, в тому числі й річкових басейнів, являється проявом закону збереження і перетворення матерії відносно процесу водообміну цієї території з атмосферою. Водний баланс річкового басейну подається у вигляді:

$$dW/dT = P - E - R, \quad (1)$$

де dW/dT - зміни запасів води в межах річкового басейну протягом певного періоду часу T ; P – атмосферні опади (дощові та тало-снігові), що надходять на поверхню басейну, E – сумарне випаровування з поверхні басейну, R – стік з басейну поверхневих та підземних вод (річковий водний стік).

Водні баланси складаються для різних за тривалістю періодів, при цьому головною перевагою в обчисленні саме багаторічних балансів є відсутність необхідності урахування змін запасів води в межах водозбору, оскільки протягом багаторічного періоду вони взаємно компенсуються ($dW/dT \rightarrow 0$) і тоді рівняння водного балансу набуває вигляду [2]:

$$P = E + R \pm \mu, \quad (2)$$

де μ – нев'язка водного балансу, що обумовлена переважно недосконалістю процесів вимірювання його складових.

Якщо поділити обидві частини рівняння на опади, отримаємо наступні співвідношення [15]:

$$1 = E/P + R/P \quad (3)$$

Перше з них E/P характеризує частку сумарного випаровування в загальній структурі водного балансу і називається коефіцієнтом посушливості, тоді як друге R/P визначає коефіцієнт стоку. Зміни пропорцій в межах даних співвідношення досить добре описують локальні прояви глобальних змін клімату в межах окремого річкового басейну.

Головною вимогою до обчислення водного балансу є те, що всі його складові маю бути виміряні або визначені незалежними методами [2]. Для дотримання цієї вимоги зазначимо, що опади, температура та відносна вологість повітря визначалися за результатами спостереження на чотирьох метеорологічних станціях (див. рис.1), річковий стік вимірювався на трьох гідрологічних постах, а сумарне випаровування обчислене через температуру і абсолютну вологість повітря за методом Константинова. Даний метод заснований на теорії турбулентної дифузії і головною його перевагою є те, що він ґрунтується на результатах стандартних спостережень на метеорологічних станціях і, таким чином, забезпечується доступність достатньої кількості вихідної інформації протягом всього розрахункового періоду.

Оскільки спостереження на метеорологічних станціях характеризують дискретні значення метеорологічних показників у окремих точках, а спостереження на гідрологічних постах показують інтегровані величини стоку води, що відносяться до всього вище розташованого басейну, необхідно здійснювати процедуру приведення метеорологічних даних до їх середніх величин по річковому басейну. Для цього в гідрології застосовується декілька підходів [2, 10], найбільш виправданим, у даному випадку, є метод зважування, коли басейни графічно розбивають системою трикутників Тиссена на зони впливу окремої метеостанції в межах досліджуваного басейну (рис.2).

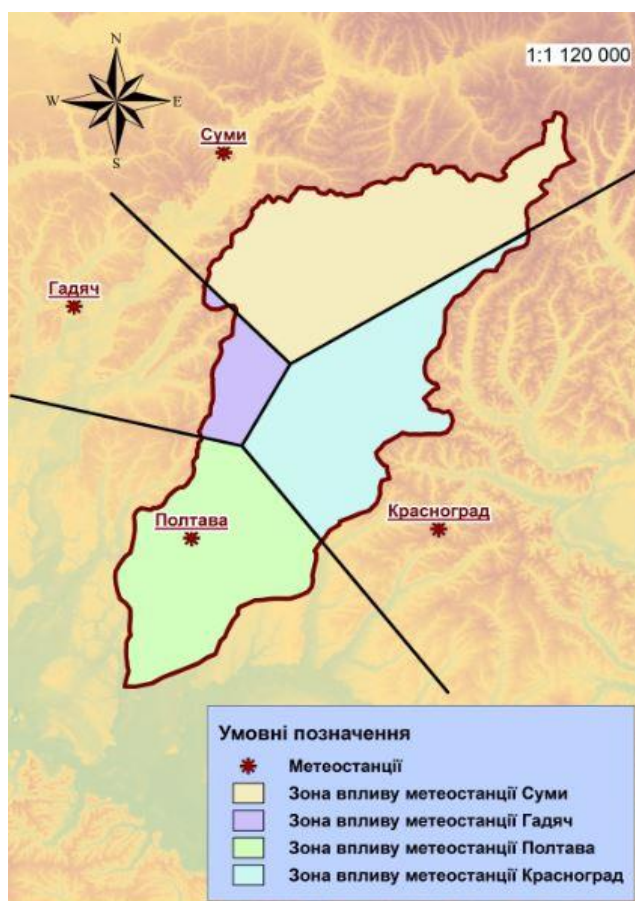


Рис. 2. Схема застосування метода зважування за площами для визначення середніх по басейну значень метеорологічних компонентів для басейну р. Ворскли

З метою виділення частки окремих метеостанцій у загальному значенні метеорологічних компонентів водного балансу басейну р. Ворскли використано-увалася програма ArcGIS, набори інструментів Conversion Tools і Spatial Analyst Tools, з допомогою яких обчислені морфометричні характеристики водозборів (табл.1). Відхилення площі басейну, обчисленої через ArcGIS від площі, наведеної в ОГХ становить 0,4% для басейну р. Ворскла – м. Кобеляки, 0,2% для басейну р. Ворскла - с.Чернеччина та 7% для басейну р. Мерло- м.Богодухів, тому отримані вагові коефіцієнти можна вважати надійними. Через використання наведених у табл. 1 вагових коефіцієнтів обчислювалися сума опадів, температура та відносна вологість повітря, а також величина снігозапасів.

На метеорологічних станціях здійснюється вимірювання величини запасу води в снігу (еквіваленту води у снігу в мм) за результатами снігомірних зйомок кожної пентади місяця та вимірювання добової суми опадів.

Таблиця 1. Площі та вагові коефіцієнти метеостанцій, спостереження на яких використані для обчислення складових водного балансу р. Ворскла

Метеорологічні станції	Гідрологічні пости					
	р. Ворскла – м.Кобеляки		р. Ворскла - с.Чернеччина		р. Мерло-м.Богодухів	
	Площа, км ²	Частка від 1	Площа, км ²	Частка від 1	Площа, км ²	Частка від 1
Суми	5011,44	0,37	4967,12	0,86		
Красноград	3766,46	0,28	782,53	0,13	286,27	1
Полтава	3797,18	0,28				
Гадяч	874,67	0,07	53,5	0,01		

Відомості про спостереження за характеристиками снігу до 1978 року опубліковані в «Метео-рологічних щорічниках», випуск 10 «Спостереження гідрометеорологічних станцій і постів над сніговим покривом», а після 1978 р. у метеорологічних щомісячниках ТМС.

Для обчислення шару вологи, що випала у вигляді снігу за розрахунковий період, визначалася різниця снігозапасів двох сусідніх пентад. У випадку, якщо її величина мала додатне значення у даний період переважали процеси снігонакопичення, якщо ж від'ємне – спостерігалася відлига. Відповідно до цього, сума всіх додатних снігозапасів характеризує загальний шар (мм) атмосферних

опадів, що випав у вигляді снігу протягом певного гідрологічного року.

Тоді різниця між загальною місячною сумою опадів та опадами у вигляді снігу відповідатиме кількості рідких опадів. За такого підходу неможливо врахувати лише тверді опади, що випали та зійшли в межах однієї пентади. Однак, за даними [1] «специфікою Українського регіону є те, що близько 80-ти відсотків відлиг тут мають адвективне походження. Вони зумовлені процесами, що характеризуються наявністю стійких деформаційних баричних полів з меридіонально орієнтованою глибокою улоговиною над східною Європою або широтними потоками повітря з Атлантики». Такі відлиги відрізняються значно вищою тривалістю (у більшості випадків понад пентаду), ніж радіаційні і тому у наведених розрахунках вони враховані.

Обчислення величини снігозапасів та водного балансу проведені за гідрологічний рік, який являє собою річний інтервал, що містить періоди накопичення та витрачання води в річковому басейні. За початок гідрологічного року приймають той місяць, коли виконується така нерівність:

$$P > R + E. \quad (4)$$

За закінчення гідрологічного року приймають місяць, коли виконується наступна нерівність:

$$P < R + E. \quad (5)$$

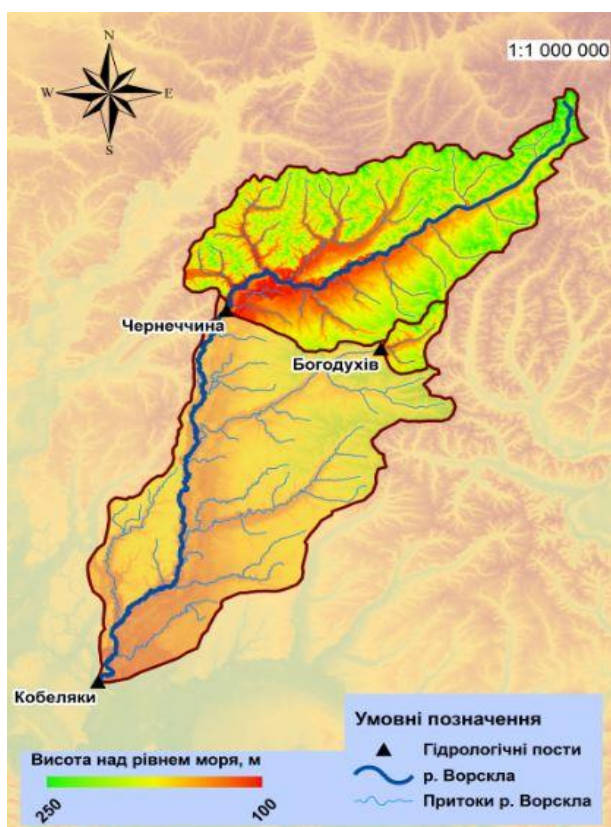


Рис. 3. Межі водозборів діючих гідрологічних постів в басейні Ворскла

Тому, початок кожного гідрологічного року є індивідуальним. Але, все ж таки для спрощення розрахунків приймають постійні межі гідрологічного року, які відносяться до початку одного з місяців. У даному випадку, відповідно до рекомендацій [2] до першого листопада.

Виклад результатів дослідження. В басейні р. Ворскла на сьогоднішній день діє три гідрологічні пости (див. табл.1), зокрема, р. Мерло – м. Богодухів, р. Ворскла – с. Чернеччина та р. Ворскла – м. Кобеляки (рис. 3).

Для кожного з них з використанням зазначених вище вагових коефіцієнтів обчислено сумарну кількість снігу та багаторічний водний баланс за спільний період 1961-2015 рр.

З метою приведення результатів гідрологічних та метеорологічних спостережень до єдиного розрахункового періоду кожен з наявних пропусків у вимірюваннях гідрологічних

та метеорологічних даних було відновлено за допомогою пунктів-аналогів. Дотримуючись описаних вище передумов та із введенням вагових коефіцієнтів (табл. 1) обчислені середні багаторічні значення кожної зі складових водного балансу, а також їх середні квадратичні похибки $\pm\sigma_a$ (табл.2).

Таблиця 2. Значення середньої квадратичної похибки величин складових водного балансу величин за період 1961-2015 рр.

Річка-пост	$\pm\sigma_a$						
	P , мм	$P_{\text{дощ}}$, мм	$P_{\text{сніг}}$, мм	t , °C	ρ_a , гПа	R , мм	$R_{\text{водопілля}}$, мм
р. Мерло-м.Богодухів	15,0	16,8	7,8	0,154	0,064	3,7	2,8
р. Ворскла - с.Чернеччина	14,0	14,3	8,4	0,145	0,064	5,2	3,3
р. Ворскла – м.Кобеляки	13,2	13,7	7,0	0,144	0,067	3,6	2,4

Тут варто відмітити, що середні квадратичні похибки за умови використання прийнятої в роботі методики обчислення сумарного випаровування за багаторічний період визначити не можна, тому наведені відхилення окремо для температури і абсолютної вологості повітря

Відповідно до табл. 2, варто відмітити, що найбільші значення похибки характерні для опадів у вигляді снігу, а також для річкового стоку періоду весняного водопілля, вони досягають 9%, решта похибок знаходиться в межах 2-3%.

Величина температури повітря за сучасний період та період кліматичної норми для кожного з діючих гідрологічних постів в басейні р. Ворскла представлено в табл.3. Відповідно до розрахунків, наведених в табл.3, температура повітря в басейні р. Ворскла змінилася дещо нерівномірно. В загальному випадку, вона зросла на величину біля 1°C і таке зростання виявилось найбільш відчутним у південно-східній частині басейну. У внутрішньорічному розрізі зростання температури повітря також досить неоднозначне, зокрема, у січні воно найбільше і досягає 2,6-3 °C, але одночасно простежується ще один підйом у серпні, натомість у травні та жовтні температура зросла найменше. В гідрологічному відношенні суттєвий вплив на внутрішньорічний розподіл стоку має, в першу чергу, зростання температури (1,7°C) у період сніготанення (лютий-березень), коли формується стік води періоду весняного водопілля.

Зростання температури повітря викликало зниження запасу вологи в снігу в басейнах кожного з діючих гідрологічних постів р. Ворскла(табл.4). Через величину водного еквіваленту снігу обчислене значення сніго-дощового співвідношення як частки опадів у вигляді снігу від загальної місячної або річної суми опадів, %, тоді обернена величина характеризуватиме частку опадів у рідкому стані від загальної суми опадів.

Таблиця 3. Температура повітря (°C) в басейні річки Ворскла за 1961-2015 рр.

Річка-пункт	Період	XI	XII	I	II	III	IV	V
р. Мерло-м.Богодухів	КН*	0,8	-3,6	-7,3	-5,5	-0,3	8,8	15,7
	СП**	1,7	-3,2	-4,4	-3,8	1,5	9,8	16,0
	різниця	0,9	0,4	3,0	1,6	1,8	0,9	0,3
р. Ворскла - с.Чернеччина	КН*	0,6	-4,1	-7,6	-6,4	-1,1	8,1	15,0
	СП**	0,7	-3,8	-5,0	-4,8	0,5	8,5	14,7
	різниця	0,1	0,2	2,6	1,6	1,6	0,5	-0,2
р. Ворскла – м.Кобеляки	КН*	1,0	-3,7	-7,3	-5,9	-0,7	8,5	15,3
	СП**	1,3	-3,4	-4,4	-4,2	1,0	9,2	15,3
	різниця	0,4	0,3	2,8	1,7	1,7	0,7	0,0

Річка-пункт	Період	<i>VI</i>	<i>VII</i>	<i>VIII</i>	<i>IX</i>	<i>X</i>	<i>рік</i>
р. Мерло-м.Богодухів	КН*	18,9	20,9	19,7	14,6	7,8	7,5
	СП**	19,7	22,0	21,2	15,2	8,2	8,7
	<i>різниця</i>	<i>0,9</i>	<i>1,1</i>	<i>1,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,4</i>	<i>1,1</i>
р. Ворскла - с.Чернеччина	КН*	18,1	19,4	18,4	13,3	6,9	6,7
	СП**	18,5	20,7	19,9	13,5	6,9	7,5
	<i>різниця</i>	<i>0,4</i>	<i>1,3</i>	<i>1,4</i>	<i>0,3</i>	<i>0,0</i>	<i>0,8</i>
р. Ворскла – м.Кобеляки	КН*	18,4	20,1	19,0	13,9	7,4	7,2
	СП**	19,0	21,2	20,3	14,2	7,6	8,1
	<i>різниця</i>	<i>0,6</i>	<i>1,1</i>	<i>1,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,2</i>	<i>0,9</i>

Примітка. КН*-період кліматичної норми 1961-1990 рр.; СП**-сучасний період 1991-2015 рр.

Таблиця 4. Запас вологи в снігу (мм) та частка опадів у вигляді снігу від загальної місячної або річної суми опадів (%) в басейні річки Ворскла за період 1961-2015 рр.

Річка-пост	Характеристика	Період	<i>XI</i>	<i>XII</i>	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>рік</i>
р. Мерло-м.Богодухів	запас вологи в снігу, мм	КН*	6	18	32	22	13	90
		СП**	5	10	22	19	11	67
		<i>різниця</i>	<i>-1</i>	<i>-7</i>	<i>-10</i>	<i>-4</i>	<i>-1</i>	<i>-23</i>
	частка опадів у вигляді снігу, %	КН*	12	32	70	57	41	16
		СП**	11	25	53	49	24	11
		<i>різниця</i>	<i>-1</i>	<i>-7</i>	<i>-18</i>	<i>-8</i>	<i>-16</i>	<i>-5</i>
р. Ворскла - с.Чернеччина	запас вологи в снігу, мм	КН*	12	27	37	22	17	115
		СП**	8	17	33	19	13	90
		<i>різниця</i>	<i>-4</i>	<i>-9</i>	<i>-4</i>	<i>-3</i>	<i>-4</i>	<i>-26</i>
	частка опадів у вигляді снігу, %	КН*	23	51	87	65	49	19
		СП**	19	47	85	57	31	16
		<i>різниця</i>	<i>-4</i>	<i>-4</i>	<i>-2</i>	<i>-8</i>	<i>-17</i>	<i>-3</i>
р. Ворскла – м.Кобеляки	запас вологи в снігу, мм	КН*	10	23	34	25	16	106
		СП**	6	14	29	21	13	80
		<i>різниця</i>	<i>-3</i>	<i>-8</i>	<i>-5</i>	<i>-4</i>	<i>-3</i>	<i>-25</i>
	частка опадів у вигляді снігу, %	КН*	20	43	78	68	46	18
		СП**	16	37	72	59	29	14
		<i>різниця</i>	<i>-4</i>	<i>-6</i>	<i>-6</i>	<i>-9</i>	<i>-17</i>	<i>-4</i>

Примітка. КН*-період кліматичної норми 1961-1990 рр.; СП**-сучасний період 1991-2015 рр.

Так, загальна кількість опадів, що випадають у вигляді снігу знизилася в середньому по басейну на 25 мм, а відносно загальної річної суми опадів – на 4%. При цьому реакція на зростання температури повітря (див. табл. 4) у абсолютному значенні найбільше проявилася безпосередньо у січні місяці, коли різниця двох періодів досягала 8-10 мм за місяць. Одночасно відносна частка опадів, що випали у вигляді снігу до їх місячної суми найбільша в березні (17-18%), коли і відбувається основна фаза проходження весняного водопілля. Звідси варто відмітити, що в басейні річки Ворскла для сучасного періоду характерним є збільшення кількості

рідких опадів у період сніготанення та зниження загальної величини снігозапасів, що певною мірою узгоджується з висновками, наведеними в роботі [15], тобто загальна водно-балансова система подібним чином реагує на зростання температури повітря у різних регіонах.

Описані вище процеси, тобто зростання температури повітря і зниження величини снігових запасів призводять до наступних змін параметрів весняного водопілля (табл. 5). Відповідно до розрахунків, в першу чергу, можна відмітити зниження більше ніж вдвічі максимальної витрати води весняного водопілля на кожному з гідрологічних постів. Також важливо наголосити на зменшенні сумарного стоку періоду водопілля, що, з одного боку, обумовлене зниженням загальної кількості опадів, що випадають на водозбір у вигляді снігу та зростанням частки рідких опадів у березні, а з іншого боку, фізико-географічними особливостями та розміром басейнів річок. Так, для р. Мерло зменшення становить лише 5 мм оскільки вона має найменшу площу та південно-східне розташування басейну, що обумовило порівняно невисокий стік весняного водопілля і в попередній період кліматичної норми, тобто даний басейн не має достатнього ресурсу для більш різкого зниження стоку періоду весняного водопілля. Тоді як р. Ворскла - с. Чернеччина займає найбільш північну частину басейну з найвищими абсолютними значеннями шару водопілля, тому і спад його тут зафіксовано найбільш інтенсивний. Для р. Ворскла з замикальним створом м. Кобеляки його показники є певною мірою інтегрованими по всьому басейну. Що стосується тривалості водопілля, то його зміни, головною мірою, залежать від розміру басейну, так у найменшому басейні р. Мерло тривалість водопілля скоротилася на 4 дні, тоді як по замикальному створу Кобеляки навпаки зросла на 2 дні.

Спираючись на проведені розрахунки можна сказати, що зростання температури повітря та зниження частки опадів у вигляді снігу призвели до внутрішньорічного перерозподілу водності, а найбільш повно простежити даний процес можна за рівнянням водного балансу.

Таблиця 5. Характеристики весняного водопілля в басейні р. Ворскла за 1961-2015 рр.

Річка-пост	Період	Характеристика			
		Тривалість водопілля	Максимальна витрата води, м ³ /с	Шар стоку, мм	Стік водопілля у % від стоку за рік
р. Мерло-м. Богодухів	КН*	44	13,9	33	46
	СП**	40	7,0	28	34
	різниця	-4	-6,8	-5	-12
р. Ворскла - с. Чернеччина	КН*	127	186,9	47	52
	СП**	126	84,0	34	45
	різниця	-1	-102,9	-13	-7
р. Ворскла – м. Кобеляки	КН*	60	231,2	37	46
	СП**	62	109,1	29	39
	різниця	2	-122,1	-8	-7

Примітка. КН*-період кліматичної норми 1961-1990 рр.; СП**-сучасний період 1991-2015 рр.

Багаторічний водний баланс р. Ворскла представлено в табл. 6 та характеризується певними закономірностями.

Таблиця 6. Водний баланс (в мм) басейну р. Ворскла за 1961-2015 рр.

Річка-пункт	Період*: **	Складові водного балансу	місяці												рік
			XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
р. Мерло-м. Богодухів	КН	<i>P</i>	47	55	45	39	31	39	48	70	67	49	38	36	564
		<i>R</i>	3	3	3	6	18	17	4	3	3	2	3	4	69
		<i>E</i>	32	4	2	3	38	57	74	80	79	68	54	36	525
		μ	12	49	40	31	-25	-35	-30	-13	-15	-21	-19	-5	-31
	СП	<i>P</i>	42	40	42	38	48	39	53	74	63	47	57	44	586
		<i>R</i>	5	5	5	9	17	14	5	4	3	2	4	6	78
		<i>E</i>	33	4	6	6	41	56	76	86	83	72	56	36	554
		μ	5	32	31	23	-10	-31	-27	-16	-24	-27	-3	2	-45
р. Ворскла - с. Чернеччина	КН	<i>P</i>	51	52	42	34	36	38	52	69	76	61	43	39	593
		<i>R</i>	5	6	5	6	17	27	7	3	4	3	3	5	91
		<i>E</i>	28	6	2	1	37	57	72	80	82	67	46	35	512
		μ	18	40	36	28	-19	-46	-26	-14	-10	-9	-6	-1	-10
	СП	<i>P</i>	39	37	38	34	43	37	58	60	71	42	57	48	563
		<i>R</i>	6	4	4	5	14	18	5	3	3	2	2	5	72
		<i>E</i>	28	2	2	4	38	57	75	80	85	71	51	35	526
		μ	6	30	33	25	-9	-38	-22	-23	-17	-32	5	9	-34
р. Ворскла - м. Кобеляки	КН	<i>P</i>	49	52	43	37	34	39	51	68	73	55	41	39	581
		<i>R</i>	5	5	5	6	13	21	6	3	3	3	3	4	79
		<i>E</i>	28	5	2	3	38	57	72	80	81	67	51	35	518
		μ	16	43	36	28	-16	-40	-27	-16	-11	-15	-12	0	-16
	СП	<i>P</i>	40	39	40	35	44	37	55	68	68	42	58	48	575
		<i>R</i>	5	5	5	6	11	13	7	4	4	3	3	5	70
		<i>E</i>	32	4	6	4	38	56	79	80	85	71	52	36	542
		μ	3	30	29	25	-4	-31	-31	-16	-20	-31	3	7	-37

Примітка. КН*-період кліматичної норми 1961-1990 рр.; СП**-сучасний період 1991-2015 рр.

Нев'язка обчислення багаторічного водного балансу не повинна перевищувати 10% від загальної кількості опадів, тому можна стверджувати, що всі баланси, що наведені в табл. 5 є коректними.

При цьому варто відмітити, що найбільша величина похибки (5% та 8%) відноситься до басейну р. Мерло і це є закономірним, оскільки для таких невеликих водозборів найбільш відчутним є вплив місцевих факторів формування стоку та генералізація у приведенні метеорологічних характеристик і тому методика [2] рекомендує брати за основу баланси, обчислені для середніх за площею річок. Саме таким є баланс р. Ворскла -с.Чернеччина, який обчислений найбільш точно і похибка якого за період кліматичної норми знаходиться в межах 1%.

Динаміка зміни атмосферних опадів та стоку води в межах басейну дещо неоднозначна, оскільки для переважної більшості його території вони знижуються, тоді як в басейні р. Мерло зростають, що обумовлене домінуючим впливом тут метеостанції Красноград, однак це питання потребує більш детального вивчення із залученням інших метеостанцій степової зони Лівобережжя Дніпра та додаткових

водозборів малих річок. По кожному з трьох досліджуваних басейнів спостерігається зростання величини сумарного випаровування у сучасний період майже на 5% і цей процес характеризується значною внутрішньорічною неоднорідністю, як й у випадку з температурою повітря (див. табл.2). Зокрема, спостерігається два періоди інтенсивного його зростання, які умовно можна охарактеризувати як зимовий і літній, коли його величина досягає 4 мм на місяць.

Коефіцієнти посушливості та стоку води змінюються у двох взаємно протилежних напрямках. Так, викликане зростанням температури повітря – збільшення коефіцієнту посушливості у середній течії р. Ворскли становить 0,07, а в басейні з замикальним створом м. Кобеляки 0,05. При цьому лише приблизно третина цього підвищення компенсується відповідним зниженням коефіцієнту стоку води річок на 0,025 та 0,015 відповідно. Така невідповідність обумовлює значне зростання величини нев'язок розрахунку водного балансу сучасного періоду. Нев'язки усіх трьох багаторічних водних балансів суттєво змінилися зі знаком «мінус», що свідчить про появу неоднорідностей у їх витратних частинах, де зафіксоване чітке зростання сумарного випаровування і за умови подальшого зростання температури повітря тенденції будуть поглиблюватися.

Для більш детального розгляду процесів формування річкового стоку води та впливу на них змін клімату розглянемо деталізовані рівняння водного балансу із поділом загальних опадів за агрегатним станом: умовно кажучи, на сніг $P_{\text{СНІГ}}$ та дощ $P_{\text{ДОЩ}}$, а також поділом річкового стоку води на стік весняного водопілля $R_{\text{ВОДОПІЛЛЯ}}$ та сумарний стік меженних сезонів $R_{\text{МЕЖ}}$, як різницю між сумарним стоком R та стоком періоду весняного водопілля, тоді рівняння водного балансу матиме наступний вигляд:

$$P_{\text{СНІГ}} + P_{\text{ДОЩ}} = E + R_{\text{ВОДОПІЛЛЯ}} + R_{\text{МЕЖ}} \pm \mu. \quad (6)$$

Результати таких розрахунків наводяться в табл. 7

Таблиця 7. Деталізований річний водний баланс басейну р. Ворскла за 1961-2015 рр

Річка-пост	Період	Характеристика					
		$P_{\text{СНІГ}}$	$P_{\text{ДОЩ}}$	E	$R_{\text{ВОДОПІЛЛЯ}}$	$R_{\text{МЕЖ}}$	μ
р. Мерло-м.Богодухів	КН*	90	474	525	33	36	-31
	СП**	67	519	554	28	50	-45
	різниця	-23	48	29	-5	14	14
р. Ворскла - с.Чернеччина	КН*	115	478	512	47	44	-10
	СП**	90	473	526	34	38	-34
	різниця	-25	5	14	-7	6	24
р. Ворскла – м.Кобеляки	КН*	106	475	518	37	38	-16
	СП**	80	495	542	29	41	-38
	різниця	-26	20	24	-8	3	22

Примітка. КН*-період кліматичної норми 1961-1990 рр.; СП**-сучасний період 1991-2015 рр.

В першу чергу варто відмітити, що реакція на зміну клімату досить суттєво залежить від розміру річкового басейну. Так найменший басейн р. Мерло найбільш різко відреагував на зростання температури повітря та пов'язане з ним збільшення дощової і зниження снігової складових у прихідній частині водного балансу через зниження частки весняного водопілля та найвище в басейні р. Ворскла (майже 50%)

зростання сумарного стоку води меженних сезонів. Такі ж зміни намітилися і на більших за розміром водозборах, однак проходять вони поки що менш різко. Тобто, зниження частки снігу в середньому по басейну на 25 мм супроводжується зростанням кількості рідких опадів на 20 мм, але ці зміни відбуваються більш неоднорідно. Так само, зниження стоку води періоду весняного водопілля супроводжується його зростанням у меженні сезони. І лише величина сумарного випаровування стабільно зростає по всьому басейну і цей процес відбувається інтенсивніше у його південній частині.

Висновки та обговорення. Головною спільною рисою усіх досліджуваних водних балансів є зростання температури повітря в межах басейнів і пов'язаної з ним величин сумарного випаровування, яке є більш відчутним у південній частині водозбору, як наслідок зменшення частки твердих та збільшення частки рідких опадів, що призводить до зниження стоку води весняного водопілля та збільшення сумарного стоку меженних сезонів.

В загальному випадку про виведення зі стану динамічної рівноваги водно-балансової системи басейну р. Ворскла (переважно за рахунок наявності локальних проявів глобальних змін клімату) свідчить значне зростання величини нев'язки у кожному з водних балансів. Така тенденція до зростання величини нев'язок більше ніж вдвічі характерна не лише для басейну р. Ворскла, вона була зафіксована також на р. Західний Буг [8]. На вказані зміни найбільш різко реагують менші за розміром річкові басейни.

Список літератури

1. Бабіченко В. М., Дячук В. А. та ін. (ред). Клімат України. Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут, 2003. 564 с.
2. Гидрологические и водно-балансовые расчеты / Под ред. Н.Г. Галущенко. К.: Вища школа, 1987. 248 с.
3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.6. Украина и Молдавия. Под ред. М.С. Каганера. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 884 с.
4. Справочник по водным ресурсам / Под ред. Б. И. Стрельца. К.: Урожай, 1987. 304 с.
5. Мірошніченко К. А., Чорноморець Ю. О. Вплив змін клімату на водний баланс та динаміку стоку води річки Ворскла Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2016. Т. 2(41). С. 58-68.
6. Adam J.C., Hamlet A.F. and Lettenmaier D.P., 2009: Implications of global climate change for snowmelt hydrology in the twenty-first century. *Hydrol. Processes*, 23, 962–972, doi:10.1002/hyp.7201.
7. Barnett T.P. and Coauthors, 2008: Human-induced changes in the hydrology of the western United States. *Science*, 319, 1080–1083, doi:10.1126/science.1152538.
8. Havryliuk Yuliia, Chornomorets Yuliia The influence of climate changes on the water balance in the Western Bug River basin – Kamianka Buzka// Air and water components of the environment Cluj-Napoca, Romania, 17-19th of March, 2017. P. 211-218.
9. Hamlet A.F., Mote P.W., Clark M.P. and Lettenmaier D.P., 2005: Effects of temperature and precipitation variability on snowpack trends in the western United States. *J. Climate*, 18, 4545–4561, doi:10.1175/JCLI3538.1.
10. Healy R.W., Winter T.C., LaBaugh J.W., Franke O.L., 2007. Water budgets: foundations for effective water-resources and environmental management. *US Geol Surv Circ* 1308, 90 pp.
11. Hidalgo, H. G. and Coauthors, 2009: Detection and attribution of streamflow timing changes to climate change in the western United States. *J. Climate*, 22, 3838–3855.
12. Mote, P. W., Hamlet A.F., Clark M. P. and Lettenmaier D.P., 2005: Declining mountain snowpack in western North America. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 39–45.
13. Pierce, D. W. and Coauthors, 2008: Attribution of declining western U.S. snowpack to human effects. *J. Climate*, 21, 6425–6444.
14. Rasmussen, R.M. and Coauthors, 2011: High-resolution coupled climate runoff simulations of seasonal snowfall over Colorado: A process study of current and warmer climate. *J. Climate*, 24, 3015–3048.
15. Rasmussen R., Ikeda K., Liu C., Gochis D., Clark M., Da A., Gutmann E., Dudhia J., Chen F., Barlage M., Yates D. and Zhang G., 2014: Climate Change Impacts on the Water Balance of the Colorado Headwaters: High-Resolution Regional Climate Model Simulations, *J. Hydrometeorol.*, 15, 1091–1116.
16. Stewart, I.T., 2009: Changes in snowpack and snowmelt runoff for key mountain regions. *Hydrol. Processes*, 23, 78–94.
17. WMO Media Centre, 2015: New Two-Tier approach on "climate normal".
18. IPCC, 2013: "Fifth

Assessment Report - Climate Change 2013". **19.** WMO, 2007: "The role of climatological normals in a changing climate", World Climate Data and Monitoring Programme -No. 61, WMO-TD No. 1377. **20.** http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf.

References

1. Babichenko V. M., Diachuk V. A. *ta in. (red). Klimat Ukrainy. Ukrains'kyj naukovo-doslidnyj hidrometeorologichnyj instytut, 2003. 564 c.* **2.** Hidrologicheskie i vodno-balansovye raschety / Pod red. N.G. Galushhenko. K.: Vishha shkola, 1987. 248 s. **3.** Resursy poverhnostnyh vod SSSR. T.6. Ukraina i Moldavija. Pod red. M.S. Kaganera. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 884 s. **4.** Spravochnik po vodnym resursam / Pod red. B. I. Strel'ca. K.: Urozhaj, 1987. 304 s. **5.** Miroshnichenko K. A., Chornomorets' Yu. O. *Vplyv zmin klimatu na vodnyj balans ta dynamiku stoku vody richky Vorskla Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroekolohiia, 2016. T. 2(41). S. 58-68.* **6.** Adam J. C., Hamlet A.F. and Lettenmaier D.P., 2009: Implications of global climate change for snowmelt hydrology in the twenty-first century. *Hydrol. Processes*, 23, 962–972, doi:10.1002/hyp.7201. **7.** Barnett T.P. and Coauthors, 2008: Human-induced changes in the hydrology of the western United States. *Science*, 319, 1080–1083, doi:10.1126/science.1152538. **8.** Havryliuk Yuliia, Chornomorets Yuliia The influence of climate changes on the water balance in the Western Bug River basin – Kamianka Buzka/ Air and water components of the environment Cluj-Napoca, Romania, 17-19th of March, 2017. P. 211-218. **9.** Hamlet A. F., Mote P. W., Clark M. P. and Lettenmaier D. P., 2005: Effects of temperature and precipitation variability on snowpack trends in the western United States. *J. Climate*, 18, 4545–4561, doi:10.1175/JCLI3538.1. **10.** Healy R.W., Winter T.C., LaBaugh J.W., Franke O.L., 2007. Water budgets: foundations for effective water-resources and environmental management. *US Geol Surv Circ* 1308, 90 pp. **11.** Hidalgo, H. G. and Coauthors, 2009: Detection and attribution of streamflow timing changes to climate change in the western United States. *J. Climate*, 22, 3838–3855. **12.** Mote, P.W., Hamlet A.F., Clark M.P. and Lettenmaier D.P., 2005: Declining mountain snowpack in western North America. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 39–45. **13.** Pierce, D.W. and Coauthors, 2008: Attribution of declining western U. S. snowpack to human effects. *J. Climate*, 21, 6425–6444. **14.** Rasmussen, R.M. and Coauthors, 2011: High-resolution coupled climate runoff simulations of seasonal snowfall over Colorado: A process study of current and warmer climate. *J. Climate*, 24, 3015–3048. **15.** Rasmussen R., Ikeda K., Liu C., Gochis D., Clark M., Da A., Gutmann E., Dudhia J., Chen F., Barlage M., Yates D. and Zhang G., 2014: Climate Change Impacts on the Water Balance of the Colorado Headwaters: High-Resolution Regional Climate Model Simulations, *J. Hydrometeorol.*, 15, 1091–1116. **16.** Stewart, I.T., 2009: Changes in snowpack and snowmelt runoff for key mountain regions. *Hydrol. Processes*, 23, 78–94. **17.** WMO Media Centre, 2015: New Two-Tier approach on "climate normal". **18.** IPCC, 2013: "Fifth Assessment Report - Climate Change 2013". **19.** WMO, 2007: "The role of climatological normals in a changing climate", World Climate Data and Monitoring Programme -No. 61, WMO-TD No. 1377. **20.** http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf.

Вплив сучасних змін у співвідношенні сніго-дощового живлення річок на структуру водного балансу їх басейнів (на прикладі річкового басейну Ворскли)

Чорноморець Ю.О., Лук'янець О.І.

У статті представлені результати дослідження сніго-дощового співвідношення живлення річок та водного балансу басейну р. Ворскла. Для розрахунків використані результати спостережень на трьох гідрологічних постах і чотирьох метеорологічних станціях. Спільний період спостережень за кожною характеристикою – 1961-2015 рр. З метою порівняння та виявлення змін використано сучасний період і період кліматичної норми (1961-1990 рр.). Для визначення середніх по басейну значень метеорологічних компонентів та складових водного балансу застосовано метод зважування за площами Нев'язки розрахунку водних балансів не перевищують 8% від загальної кількості опадів. Температура повітря в басейні р. Ворскла зросла на 1 °C порівняно з періодом кліматичної норми. Запас вологи в снігові знизився на 25 мм. У сніго-дощовому співвідношенні живлення частка твердих опадів знизилася на 4%. Сумарне випаровування зросло в середньому на 20 мм. Стік весняного водопілля знизився на 7 мм та підвищився сумарний стік меженних сезонів. Нев'язка розрахунку водних балансів в сучасний період зросла в середньому на 20 мм за рахунок витратних складових водних балансів. Коефіцієнти посушливості та стоку змінюються у двох взаємно протилежних напрямках. Так, викликане

зростанням температури повітря, збільшення коефіцієнту посушливості становить 0,06. При цьому лише приблизно третина цього підвищення компенсується відповідним зниженням коефіцієнту стоку води річки. Це обумовлює зростання величини невязок за рахунок витратної частини рівнянь водного балансу. На вказані зміни найбільш різко реагують менші за розміром річкові басейни.

Ключові слова: басейн р. Ворскла, водний баланс, атмосферні опади, стік води,, сумарне випаровування. кліматичні зміни, сніго-дощове співвідношення живлення річок.

Влияние современных изменений в соотношении снегодождевого питания рек на структуру водного баланса их бассейнов (на примере речного бассейна Ворсклы)

Черноморец Ю.А., Лукьянец О.И.

В статье представлены результаты исследования снегодождевого соотношения питания рек и водного баланса бассейна р. Ворскла. Для расчетов использованы результаты наблюдений на трех гидрологических постах и четырех метеорологических станциях. Общий период наблюдений за каждой характеристикой - 1961-2015 гг. В целях сравнения и выявления изменений использован современный период и период климатической нормы (1961-1990 гг.). Для определения средних по бассейну значений метеорологических компонентов и составляющих водного баланса использован метод взвешивания по площадям. Невязка расчета водных балансов не превышает 8% от общего количества осадков. Температура воздуха в бассейне р. Ворскла выросла на 1 °С по сравнению с периодом климатической нормы. Запас влаги в снеге снизился на 25 мм. В снегодождевом соотношении питания доля твердых осадков снизилась на 4%. Суммарное испарение возросло в среднем на 20 мм. Сток весеннего половодья снизился на 7 мм и повысился суммарный сток меженных сезонов. Невязка расчета водных балансов в современный период выросла в среднем на 20 мм за счет расходных составляющих водных балансов. Коэффициенты засушливости и стока изменяются в двух взаимно противоположных направлениях. Так, вызванное ростом температуры воздуха, увеличение коэффициента засушливости составляет 0,06. При этом лишь примерно треть этого повышения компенсируется соответствующим снижением коэффициента стока воды реки. Это обуславливает рост величины невязок за счет расходной части уравнений водного баланса. На указанные изменения наиболее резко реагируют меньшие по размерам речные бассейны.

Ключевые слова: бассейн р. Ворскла, водный баланс, атмосферные осадки, сток воды,, суммарное испарение, климатические изменения, снегодождевое соотношение питания рек.

Influence of the modern changes in the snow-rain partitioning on the water balance in the rivers basins (on the Vorskla River basin exsample)

Chornomorets Y.O., Lukianets O.I.

This paper presents the results of examinations of snow-rain partitioning and water balance in the Vorskla River basin. Used for calculations have been the results of observations at three hydrological staff gauges and four meteorological stations. A common observation period for each of the characteristics has been the period of 1961-2015. Calculated for each of the hydrological staff gauges have been weight coefficients obtained at the above meteorological stations. The modern period and the period of the climatic norm (1961-1990) has been used for comparison. Closure errors of the water balances equation have not exceed 8% of the total precipitation. The air temperature in the Vorskla River basin has increased by 1°C compared with the period of the climate norm. Because of this, the snow water equivalent has dropped by 25 mm. In the snow-rain partitioning part of solid precipitation has decreased by 4%. On the average, evapotranspiration has increased by 20 mm. The spring runoff has decreased by 7 mm, while the total amount of dry seasons runoff has increased. On the average, the closure error of the equation has increased by 20 mm due to the influence of outflow components of the water balances. The coefficient aridity and runoff coefficient has varied in two opposite directions. The increase in the coefficient aridity in the Vorskla River basin has been near 0.06 while only about one third of this increase has been offset by a corresponding decrease in the runoff coefficient. This has caused an increase in the closure error due to the outflow part of the equations of water balance. The most rapid reaction to the above changes has been observed in the smallest river basins.

Key words: Vorskla River basin , water balance, precipitation, runoff, evapotranspiration, snow-rain partitioning .

Надійшла до редколегії 14.08.2019