

УДК 624.15

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.13>

С. Бортник^{1,6}, д-р геогр. наук, проф.,
E-mail: sergiy.bortnyk@knu.ua;
О. Ободовський¹, д-р геогр. наук, проф.;
П. Гершевський², д-р геогр. наук, проф.;
Я. Шманьда³, д-р геогр. наук, проф.;
М. Луц⁴, д-р геогр. наук, проф.;
М. Хабель⁵, д-р філософії;
К. Вітковський⁶, д-р філософії;
Н. Погорільчук¹, канд. геогр. наук, доц.;
¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна;
²Інститут географії та просторового розвитку, Польська академія наук,
м. Торунь, Республіка Польща;
³Педагогічний університет імені Комісії національної освіти
м. Краків, Республіка Польща;
⁴Ягеллонський університет, м. Краків, Республіка Польща;
⁵Університет Казимира Великого, м. Бидгощ, Республіка Польща;
⁶Університет Яна Кохановського, м. Кельце, Республіка Польща

РЕАКЦІЯ БАГАТОРУКАВНИХ РІЧКОВИХ СИСТЕМ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Експлуатація гідроелектростанцій (ГЕС) є однією з основних причин трансформації річкового стоку. Зміна гідрологічного режиму впливає на ряд інших процесів, що відбуваються в руслі річки, у тому числі на трансформацію її геоморфологічних особливостей. Висвітлено вплив Канівської та Влоцлавецької гребель на гідрологічний режим Середнього Дніпра та Нижньої Вісли. За допомогою методу ІНА (Indicators of Hydrologic Alteration) та RVA (The Range of Variability Approach) визначено характер та масштаби змін режиму стоку річок Дніпра та Вісли, які спричинені функціонуванням гребель. Продемонстровано, що робота ГЕС, особливо в каскаді, є причиною змін рівня, швидкості та варіативності потоку. Оцінено, як зміна умов стоку у зв'язку з дефіцитом наносів вплинула на трансформацію річищ Вісли та Дніпра на ділянках, розташованих нижче від гребель ГЕС. За нашими результатами досліджень, реакція річкової системи на зміни режиму течії, зумовлена роботою Канівської та Влоцлавецької ГЕС, полягала у: 1) зміні ширини та глибини річищ; 2) зміні розмірів форм, що розділяють окремі протоки; 3) фіксації багаторукавної річкової системи. Більш динамічні потоки води за рахунок роботи ГЕС модифікують і пришвидшують природний процес еволюції звивистої річкової системи в багаторукавну, спричиняючи ерозію і звуження основних річищ. Як наслідок, бічні русла (протоки та відгалуження) займають вище гіпсометричне положення над основним руслом. Разом з тим вирівнювання потоку води в руслах спричиняє зниження рівня води і зникнення потоку в бічних руслах. У результаті розростаються острови, раніше розділені цими протоками. Сполучаючись між собою, вони утворюють широкі міжруслові форми.

Ключові слова: гідроелектростанція, гребля, ерозія, річкова система, русло, еволюція багаторукавних русел, річка Дніпро, річка Вісла.

В усьому світі греблі, в першу чергу ті, на яких збудовані ГЕС, значною мірою впливають на річкові системи. Найважливішим ефектом роботи гідроелектростанцій є трансформація гідрологічного режиму річки (Richter et al., 1996; Vörösmarty et al., 1997; Peeg et al., 2003; Gao et al., 2012; Zhang et al., 2015). У Європі 92 % річкового стоку трансформовано греблями (Nilsson et al., 2005). Крім впливу на режим стоку води, робота ГЕС також порушує безперервність транспортування уламкових наносів, що, у свою чергу, впливає на хід ерозійно-аккумулятивних процесів у руслі річки та на заплавах, викликаючи таким чином зміни прояву руслових процесів у річковій системі (Church, 1995; Kondlof, 1997; Babiński, 2002; Walling, Fang, 2003).

Геоморфологічним ефектом роботи гідроелектростанцій найчастіше є поглиблення та звуження русла річок нижче гребель (особливо на пригребельних ділянках) у результаті глибинної ерозії (Williams, Wolman, 1984; Brandt, 2000; Magilligan, Nislow, 2005; Graf, 2006; Obodovsky et al., 2006; Słowik et al., 2018). Звуження русла також може відбуватися як результат накопичення алювію вздовж його берегів (Dean et al., 2016). Причиною скупчення алювію є велика кількість завислих речовин, що надходять у русло головної річки з водами її приток, або ж зниження рівня води, що зумовлює надлишок матеріалу, який транспортується річкою. Розширення русла річки може відбуватися внаслідок бічної ерозії, якщо породи дна стримують поглиблення річки або в субстраті дна є стійкі до ерозії відклади (Williams, Wolman, 1984;

Chien, 1985; Gierszewski et al., 2020). Еволюція річкових систем під впливом гребель відбувається в різних напрямках – від розширеного до блокуючого, звивистого або багаторукавного русла (Rinaldi, 2003; Wang et al., 2007; David et al., 2016; Słowik et al., 2018).

Оскільки реакція багаторукавних річкових систем на ерозію, спричинену роботою ГЕС, ще недостатньо вивчена, дослідження впливу цих споруд на руслові процеси було проведено на прикладі рік Вісли та Дніпра. Порівняльний аналіз руслових систем цих річок показує, що обидві вони репрезентують багаторукавну систему русел (Gierszewski et al., 2020; Szymańska et al., 2021). Метою статті є дослідити зміни в положенні та структурі річищ цих двох річок, у тому числі виявити форми, які переважно розділяють русло на рукави, що спричинено роботою гідроелектростанцій. Зміни параметрів течії Дніпра та Вісли, викликані роботою Канівської (Дніпро) та Влоцлавецької (Вісла) гідроелектростанцій, представлені за допомогою індексів ІНА (Richter et al., 1996).

Територія досліджень. Для досягнення мети дослідження було обрано дві ділянки спостереження. Перша – це фрагмент дна долини Вісли нижче греблі у Влоцлаву, а друга – фрагмент дна долини Дніпра нижче греблі Канівської ГЕС (рис. 1).

Гребля Канівської ГЕС є другою (за течією) у Дніпровському каскаді водосховищ. Вона була споруджена у 1972 р. Об'єм і мінливість витрат води з водосховища залежить від добового та тижневого режиму роботи греблі (Denisowa et al., 1989). Водне господарство та

функціонування екосистеми Канівського водосховища визначаються, насамперед, об'ємом та режимом притоку води з верхньої частини каскаду (Київське водосховище) та річки Десна, яка є найбільшою притокою р. Дніпро на ділянці між Київською і Канівською греблями. Режим роботи Канівської гідроелектростанції змінювався двічі (Obodovskyi et al., 2020). У перший період, з 1973 по 1990 р., ГЕС діяла у так званому піковому режимі, і активувалася лише під час найбільшої потреби в електроенергії (рис. 2а). У другому періоді, який розпочався в 1990 р. і триває донині, Канівська ГЕС працює в річковій системі з екологічними витратами приблизно $900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ з піковими їх збільшеннями, що відбуваються лише за найбільшої потреби в електроенергії (рис. 2а).

Влоцлавецьку ГЕС введено в експлуатацію в 1969 р. Функціонування водосховища та греблі у Влоцлавку

визначається насамперед гідрологічним режимом Вісли. Це пов'язано з відсутністю значних притоків, високою пропускну здатністю, швидким водообміном (у середньому 6 днів) та обмеженими можливостями її гідравлічного впливу (Gierszewski, 2018). Режим експлуатації Влоцлавецької ГЕС змінювався двічі. У перший період, з січня 1970 р. по лютий 2002 р., електростанція працювала в піковому режимі – двічі на добу. Решту часу доби ГЕС працювала в проточному режимі (рис. 2б). Другий період, що характеризувався проточною експлуатацією греблі, тривав з лютого 2002 р. Його запровадження було пов'язане з імплементацією положень водного законодавства Республіки Польща від 18 липня 2001 р. Відтоді ГЕС функціонує безперервно протягом частини року в проточному (взимку та навесні) та інтервенційному режимах (літо та осінь) (рис. 2б).

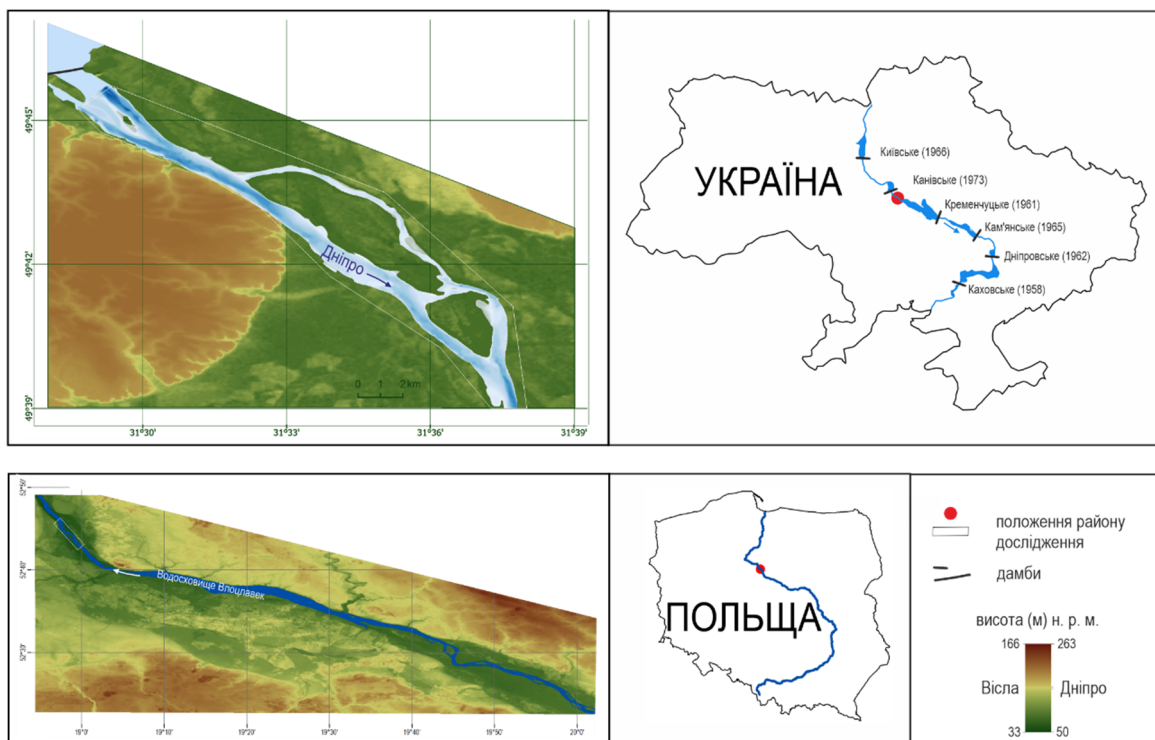


Рис 1. Розташування ділянок дослідження

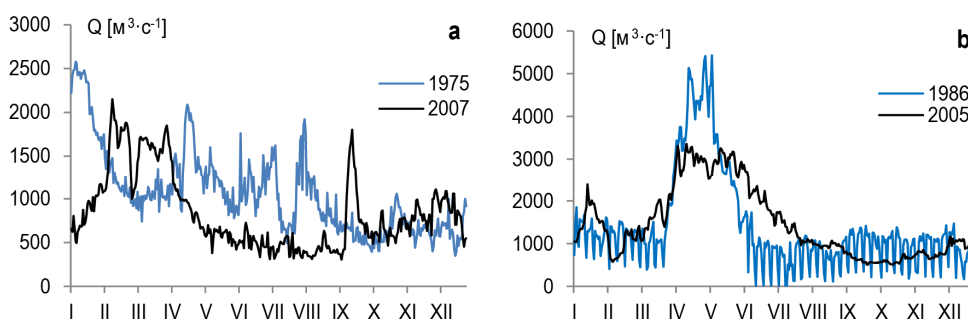


Рис. 2. Приклади гідрографів потоку в різних режимах роботи гідроелектростанцій:

а – Вісла нижче греблі у Влоцлавку (1975 р. – піковий режим проходження витрат, 2007 р. – проточний режим);
б – Дніпро нижче греблі в Каневі (1986 р. – піковий режим проходження витрат, 2005 р. – проточний режим)

Матеріали та методи дослідження. Вплив гребель на розмір і характер трансформації річкового потоку вивчався багатьма авторами за допомогою різноманітних гідрологічних показників (Olden, Poff, 2003; Magilligan, Nislow, 2005; Poff et al., 2007; Gao et al., 2009; Torabi

Haghighi, Kløve 2013; Wang et al., 2016; Li et al., 2017). У нашому дослідженні ми використовували індикатори гідрологічних змін (IHA) (Richter et al., 1996).

Зміни в положенні русла Дніпра були проаналізовані нами за три періоди: до будівництва водосховища,

відразу після зміни режиму роботи греблі з пікового на проточний і в наш час. З метою стандартизації рівнів води було створено три карти руслової системи на основі батиметричних карт, складених у 1961, 1980 та 2015 рр. (рис. 3). Базовою картою для дослідження стала батиметрична карта, укладена за власними даними, виміряними в польових умовах 25–27 липня 2015 р. Архівні батиметричні дані за 1961 та 1980 рр. отримано за даними, опублікованими у вигляді

навігаційних карт Кременчуцького водосховища у масштабі 1 : 25 000. Матеріали 1961 р. опубліковані в 1962 р. Міністерством морського флоту Союзу Радянських Соціалістичних Республік (СРСР), а матеріали за 1980 р. опубліковані в 1981 р. Дніпровським басейновим управлінням водних шляхів. Рівневий режим русла був стандартизований для середнього рівня води гідропоста Канів, що становить 80,7 м над рівнем моря.

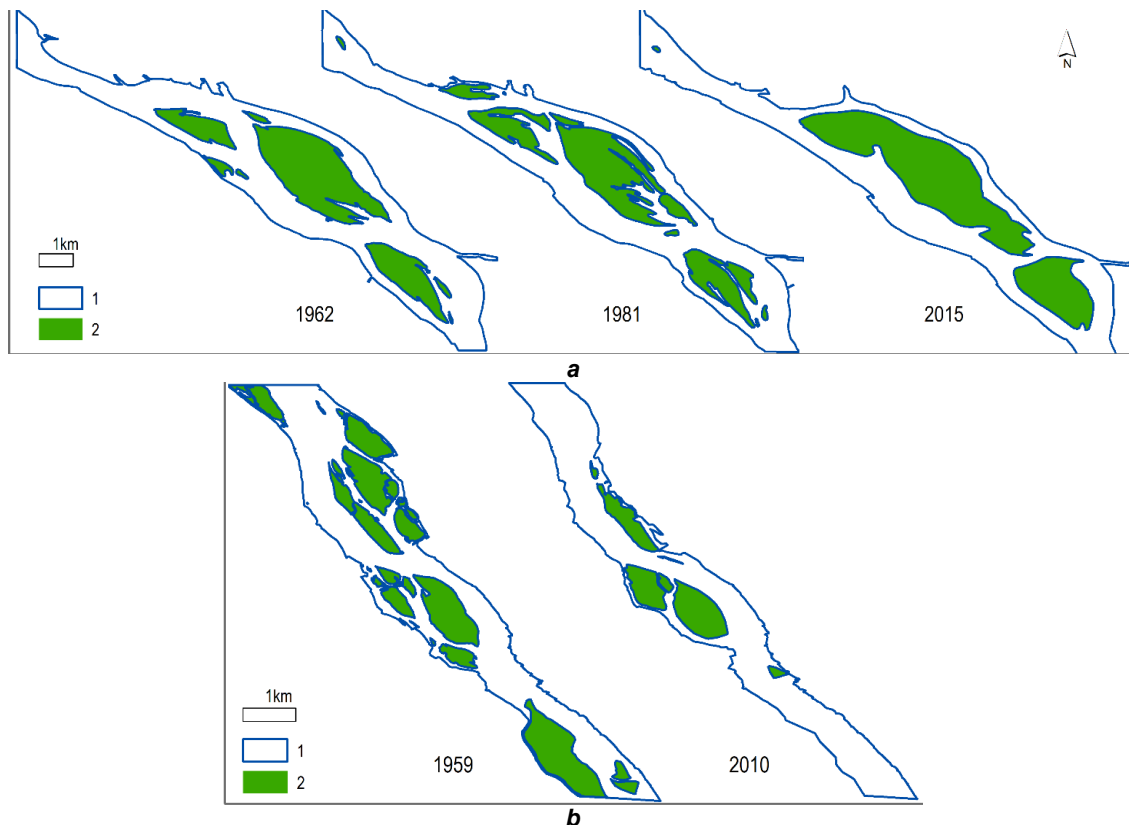


Рис. 3. Зміни в положенні русла Дніпра нижче греблі Канівської ГЕС (а) та русла Вісли нижче греблі "Влоцлавек" (б): 1 – русло річки, 2 – міжруслова форма

Значення індексів ІНА, що характеризують витрати води у Дніпрі в перерізі Канівської греблі, порівнювались нами з витратами Десни (гідропост Літки) в 1985–2013 рр.

Вплив греблі Влоцлавецької ГЕС на Віслу було досліджено шляхом порівняння характеристик її течії за період 1970–2015 рр. за даними гідропоста, розташованого перед греблею водосховища в Кемпі Польській, з характеристиками течії гідропоста Влоцлавека, розташованого в 4,4 км нижче греблі.

Разом з тим варто відмітити, що обидві річки відрізняються за розміром і характером трансформації потоку при проходженні через гідротехнічні споруди.

З метою підтвердження висловленого було оцінено зміни положення та структури русла Дніпра за допомогою програми ArcGIS 10.4. (рис. 3а). Аналіз змін русла Вісли за час функціонування греблі у Влоцлавку проведено на ділянці від 10 до 19 км нижче греблі (рис. 3б).

Для порівняльних досліджень вищевказаних ділянок річок було використано аерофотознімки 1959 р. (до будівництва греблі) та 2010 р. (40 років після побудови греблі) у масштабі 1 : 10 000 та 1 : 26 000 відповідно. Типи і розміри руслових форм, що розділяють русла, визначались на основі значення безрозмірного параметра довжини (L/w) і безрозмірного параметра ширини (w'/w). Для

їх розрахунку було проведено вимірювання: довжини форми (L), ширини русла (w) і ширини форм, що розділяють русло (w'). Далі, при аналізі значень безрозмірних параметрів довжини та ширини було виділено дві групи міжруслових форм: 1) острови та 2) міжруслові форми (Brice, Blodgett, 1978; Szymańska, Luc, 2010).

Результати дослідження.

Трансформація потоків. Робота ГЕС у Каневі та Влоцлавку мало вплинула на трансформацію середньомісячних витрат. Про це свідчать низькі значення коефіцієнта гідрологічної зміни (ГЗ) (рис. 4). Вплив Канівського водосховища із січня до кінця березня збільшував стік Дніпра і дещо зменшував його у травні. У випадку річки Вісла, вплив водосховища відзначався нижчими значеннями середніх місячних витрат нижче греблі.

Вважається, що греблі та водосховища мають особливо сильний вплив на режим високих і низьких витрат. Однак це значною мірою залежить від параметрів і функцій, які виконують ці об'єкти (Magilligan and Nislow, 2005; FitzHugh and Vogel, 2011). Результати аналізу показали, що вплив Канівської ГЕС на трансформацію маловоддя більший, ніж у випадку ГЕС у Влоцлавку. Робота гідроелектростанції в умовах пікового режиму характеризувалася значним зниженням величини найнижчих витрат у

році. Цей напрямок змін також вплинув на значну трансформацію базової течії, яка за Канівською греблею нижча, ніж у гідрометричному профілі еталонної річки (рис. 4). Проточна експлуатація Канівської греблі дозволила зберегти природні характеристики течії Дніпра під час найбільших повеней, тобто у квітні та травні. Відмічено зниження частоти максимумів потоку в діапазоні, визначеному методом RVA. У разі 1- і 3-денних максимумів вона компенсується більшою частотою їх появи вище верхньої межі RVA, а в разі 7- і 30-денних максимумів – нижче нижньої межі. Отже, можна зробити висновок, що робота ГЕС в піковому режимі спричиняє незначне збільшення частоти великих короточасних піків водного потоку. Аналіз впливу греблі у Влоцлавку на хід проходження повені показав, що медіани максимальних витрат, за винятком 1-денного максимуму, були вищими на профілі Кемпа Польська, розташованому перед водосховищем.

Серед усіх проаналізованих індексів ІНА параметри IV і V груп характеризують кількість і тривалість періодів (імпульсів) низьких потоків ($Q < 25\%$) та періодів (імпульсів) високих потоків ($Q > 75\%$) та динаміку їх змін (рис. 4).

Значна трансформація параметрів гідрологічного режиму спостерігається на багатьох річках, де працюють гідроелектростанції (Magilligan and Nislow, 2005; Richter et al., 2006; Pyron and Neumann, 2008; Costigan and Daniels, 2012; Zhang et al., 2016; Timpe and Kaplan, 2017).

Експлуатація гідроелектростанції в Каневі спричинила збільшення кількості періодів, які характеризувалися високими і низькими потоками, в шість разів під греблею, порівняно з еталонним гідрометричним профілем на Десні. Проте їхня тривалість була в 23 та 12 разів меншою відповідно. Щодо експлуатації ГЕС у Влоцлавку, то кількість періодів, які характеризувалися високими потоками, була лише вдвічі більшою, а у випадку низьких – втричі, порівняно з ділянкою Вісли над водосховищем. Середня тривалість цих періодів також скоротилася на 4 і 3 дні відповідно. Коефіцієнт НА для цієї групи параметрів досягає високих значень, що свідчить про суттєву трансформацію особливостей гідрологічного режиму. Значна зміна параметрів, що характеризують динаміку течії, пов'язана з періодом роботи ГЕС у піковому режимі. Це відображається на значеннях медіанної швидкості збільшення і зменшення течії та кількості цих змін. Вплив греблі у Каневі збільшував течію Дніпра приблизно в п'ять разів, а у випадку впливу греблі у Влоцлавку на течію Вісли – у два рази (рис. 5). Про значну трансформацію цих параметрів свідчать коефіцієнти НА, які в межах, встановлених RVA, досягають максимальних значень (рис. 4). Хід медіанного збільшення добового потоку відображає момент зміни режиму роботи ГЕС з пікового на проточний, що спостерігається на Дніпрі під Канівською греблею (рис. 5а).

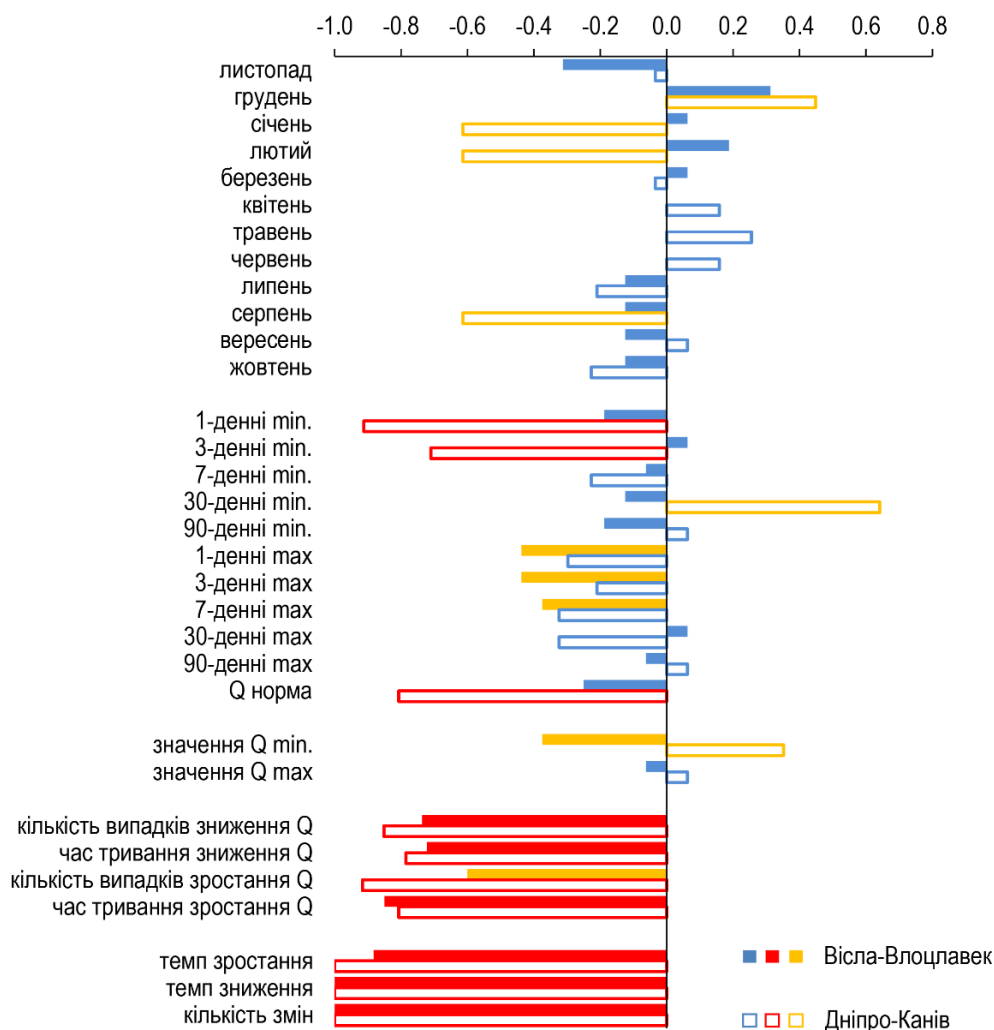


Рис. 4. Значення коефіцієнта гідрологічної трансформації (НА) для 32 показників гідрологічної трансформації (ІНА) під час роботи гідроелектростанції у Влоцлавку в 1970–2015 рр. та в Каневі в 1985–2013 рр. Синій колір відображає низьку конверсію, помаранчевий – середню конверсію, червоний – високу конверсію

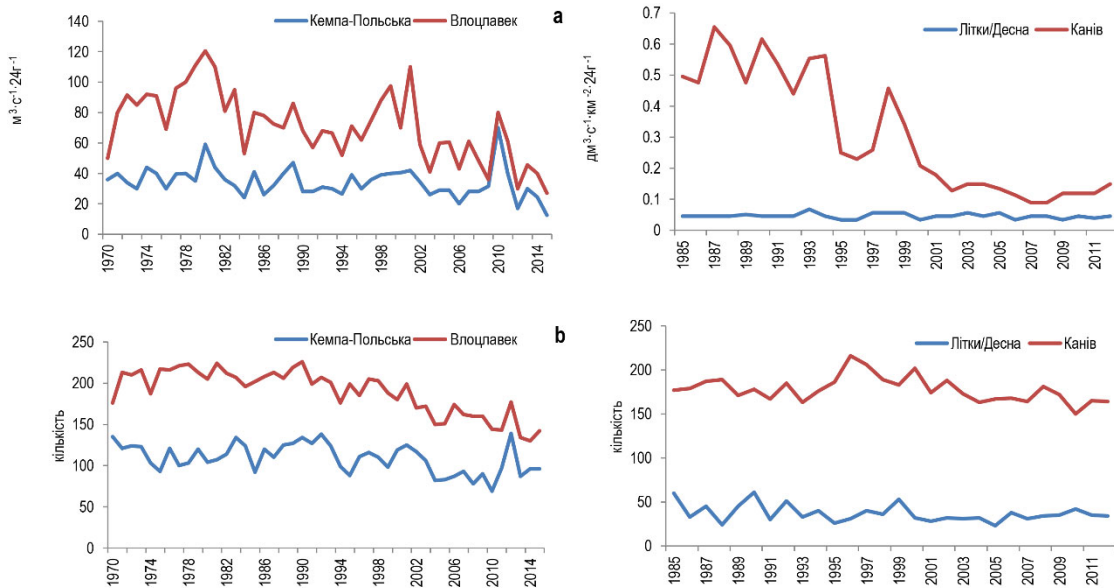


Рис. 5. Змінність медіанної швидкості зростання витрат води (а) та кількості інверсій течії (б) у 1970–2015 рр. (Вісла) та 1985–2013 рр. (Дніпро)

Зміни в будові русла. Будова та форми русла Дніпра на досліджуваній ділянці показано на рис. За станом на 1962 р. – до будівництва греблі, 1981 р. – після будівництва греблі та 2015 р. – після зміни режиму роботи Канівської гідроелектростанції. Зміни структури русла Дніпровської річкової системи досліджували шляхом вимірювання ширини руслових проток та форм, що їх розділяють у два періоди: 1962–1990 рр. (період з урахуванням років роботи ГЕС у піковому режимі); 1991–2015 рр. (період, включаючи роки роботи електростанції в проточному режимі). Детальні результати цих досліджень опубліковані в статтях (Obodovskyj et al., 2001, 2002, 2004, 2006, 2020; Szmańda et al., 2021). Встановлено, що у нижньому б'єфі ділянки русла Дніпра домінують видовжені форми. В еволюції руслової системи можна спостерігати загальну тенденцію до збільшення площі руслових форм, що розділяють протоки.

Розташування русла Вісли до (1959 р.) і після (2010 р.) будівництва греблі, на відрізок від 10 до 20 км нижче греблі у Влоцлавку, показано на рис. 3b. Результати морфометричного аналізу річкових форм у вивченій частині долини Вісли як у 1959, так і в 2010 р., детально описані у статтях (Gierszewski et al., 2015, 2020). На їх основі можна зробити висновок, що до будівництва греблі у Влоцлавку у руслі Вісли домінували річкові острови. Серед форм, що розділяють протоки, переважали видовжені та вузькі. Після понад 40 років експлуатації Влоцлавецької ГЕС кількість форм, розташованих у руслі річки нижче греблі, зменшилася майже в сім разів, а їхня загальна площа – вдвічі. Тут все ще домінують острови, які стали коротшими і ширшими. Середня ширина проток дещо зросла.

Обговорення результатів. Інтерпретуючи результати аналізу змін структури і плану русла Дніпра, слід зазначити, що до будівництва греблі (до 1970-х рр.) зміни в системі багаторукавного русла Дніпра полягали в основному у: 1) розширенні русла із стабілізованим балансом ерозії та накопичення наносів; 2) розчленуванні більших форм на дрібніші, що змінюють своє положення вздовж течії річки; 3) повільній надбудові руслових форм, переважно з піщаними відкладами (Szmańda et al., 2021). Після побудови греблі, коли ГЕС працювала у піковому режимі, тобто в 1970–1980-х рр., головне русло

Дніпра повільно поглиблювалося, що сприяло його звуженню і певному спрямленню на ділянці до 10 км нижче греблі. Острови були збільшені та розширені піщаними наносами, а бічні русла проток обміліли. Через зміни режиму роботи ГЕС на проточно-інтервенційний після 1990 р. водний режим було вирівняно. Це призвело до зникнення потоку в бічних руслах і значного збільшення площі форм, які їх розділяють.

У руслах проток, що омивають острови, та на ділянках перед островами відбулося накопичення наносів, що призвело до їх обміління та розширення. На 10 км нижче греблі за течією домінувала донна ерозія, а далі за течією – акумуляція наносів (Obodovskyj et al., 2006). У результаті накопичення наносів у бічних руслах, що відбувається внаслідок дії численних штучних хвиль, викликаних роботою ГЕС, острови сполучаються, об'єднуються, утворюючи широкі міжруслові форми.

Зміни кількості, розташування та морфології руслових і міжруслових форм на аналізованій ділянці долини Вісли зумовлені кількома причинами. Перша – це наслідки руслорегулювальних робіт, проведених на цій ділянці річки в період, що передував будівництву Влоцлавецької греблі (передусім будівництві гребель у бічних руслах), що призвело до їх прискореного заповнення алювієм. Як наслідок – частина островів і міжруслових ділянок сполучилися із заплавою. Однак зменшення кількості островів на цій ділянці русла слід пов'язати насамперед з інтенсивним його розмивом, особливо в тій частині, де сила і швидкість потоку найбільша. Поглиблення та звуження основного річища також призвело до зменшення глибини води в бічних руслах, гирлові частини яких в результаті виявились "припіднятими" щодо основного русла. В окремих випадках вони відмирили, приєднуючись до островів. Деякі острови були з'єднані із заплавою. Наявність великої кількості матеріалу, як наслідок посилення руслової ерозії, сприяла об'єднанню менших островів у більші, про що свідчить збільшення площі їх поверхні. Інша причина, що впливає на зміну параметрів русла на цій ділянці Вісли, пов'язана з геологічною будовою території. Наявність стійких до розмиву відкладів на дні русла призвела до уповільнення глибинної ерозії з одночасним збільшенням

активності бічної ерозії. Цей процес пов'язаний з бічним розширенням русла на досліджуваній ділянці Вісли.

Висновки. Розмір і характер трансформації гідрологічного режиму річок Дніпра та Вісли, спричинені роботою гідроелектростанцій у Каневі та Влоцлавку, є різними. Умови та рівень стоку в окремі місяці, а також величини мінімального і максимального стоків змінювалися незначно. Найбільша трансформація як параметрів потоку, так і системи русел (проток) відбулася, коли обидві гідроелектростанції працювали в піковому режимі. Тоді було помітним значне збільшення швидкості та середньодобових витрат води, а також фрагментація форм, що розділяють русла, у поєднанні із сильним глибинним русловим розмивом. Зміна режиму роботи гідроелектростанцій зменшила мінливість рівня водних потоків нижче гребель.

За результатами досліджень можна зробити висновок, що реакція флювіальних систем на зміни режиму течії Дніпра та Вісли внаслідок роботи ГЕС, полягала у зміні: 1) ширини та глибини русла; 2) типу і розміру форм, що розділяють русла (протоки); 3) типу річкової системи. Під впливом роботи ГЕС у початковий період після її будівництва настав період поглиблення русла багаторукавних річок, а також укрупнення шляхом з'єднання малих руслових форм у більші. Інтенсифікація умов стоку, викликана роботою ГЕС, модифікує та динамізує процес еволюції багаторукавної річкової системи через ерозійне врізання головних русел, внаслідок чого бічні русла (протоки) займають вище положення над ними. Наступне регулювання (вирівнювання) витрат через втручання роботи ГЕС у проточну систему призводить до зниження рівня води в основних руслах і припинення потоку в бічних руслах. Як наслідок – острови, розділені цими протоками, з'єднуються, утворюючи міжруслові форми. На прикладі положення річища Вісли нижче греблі у Влоцлавку слід підкреслити, що на його еволюцію також вплинуло регулювання річки, здійснене незадовго до будівництва греблі. В обох випадках період експлуатації гідроелектростанції пов'язаний з процесом ущільнення багаторукавної річкової системи. Така консолідація полягає в розширенні форм, що розділяють русла і сполучають острови в межах заплави, шляхом зникнення течії в бічних руслах.

Список використаних джерел / Reference

- Babiński, Z. (2002). Wpływ zapór na procesy korytowe rzek aluwialnych: ze szczególnym uwzględnieniem stopnia wodnego "Włocławek". Wyd. Akademia Bydgoska im. Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz.
- Bejarano, M., Sordo-Ward, A., Alonso, C., Nilsson, C. (2017). Characterizing effects of hydropower plants on sub-daily flow regimes. *J. Hydrol.*, 550, 186–200.
- Brand, S.A. (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40, 375–401.
- Chien, N. (1985). Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. *Earth Surf. Proc. Land.*, 10, 143–159.
- Church, M. (1995). Geomorphic response to river flow regulation: case studies and time scales. *Regul. Rivers Res. Manag.*, 11, 3–22.
- Costigan, K.H., Daniels M.D. (2012). Damming the prairie: human alteration of Great Plains rivers regimes. *J. Hydrol.*, 444–445, 90–99.
- David, M., Labenne, A., Carozza, J.-M., Valette, P. (2016). Evolutionary trajectory of channel planforms in the middle Garonne river (Toulouse, SW France) over a 130-year period: contribution of mixed multiple factor analysis (MFAmix). *Geomorphology*, 258, 21–39.
- Dean, D.J., Topping, D.J., Schmidt, J.C., Griffiths, R.E., Sabol, T.A. (2016). Sediment supply versus local hydraulic controls on sediment transport and storage in a river with large sediment loads. *J. Geophys. Res.-Earth Surf.*, 121, 82–110.
- Denisova, A., Timchenko, V., Nahshyna, E., Novikov, B., Riabov, A., Bass, A. (1989). Hydrology and hydrochemistry of the Dnieper and its reservoirs. Naukova dumka, Kyiv. [in Ukrainian]
- FitzHugh, T.W., Vogel, R.M., (2011). The impact of dams on flood flows in the United States. *River Res. App.*, 27(10), 1192–1215.
- Gao, B., Yang, D., Zhao, T., Yang, H. (2012). Changes in the eco-flow metrics of the upper Yangtze River from 1961 to 2008. *J. Hydrol.*, 448–449, 30–38.
- Gao, Y., Vogel, R.M., Kroll, C.N., Poff, N.L., Olden, J.D. (2009). Development of representative indicators of hydrologic alteration. *J. Hydrol.*, 374, 136–147.
- Gierszewski, P. (2018). Hydromorfologiczne uwarunkowania funkcjonowania geosystemu Zbiornika Włocławskiego. *Prace Geograficzne*, 268. IGI PAN, Warszawa.
- Gierszewski, P., Szymańska, J., Luc, M. (2015). Zmiany układu koryt Wisły spowodowane funkcjonowaniem stopnia wodnego „Włocławek” na podstawie analizy zdjęć lotniczych. *Przegląd Geograficzny*, 87, 3, 517–533.
- Gierszewski, P.J., Habel, M., Szymańska, J., Luc, M. (2020). Evaluating effects of dam operation on flow regimes and riverbed adaptation to those changes. *Science of the Total Environment*, 710, 136202.
- Graf, W.L. (2006). Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 79(3–4), 336–360.
- Grant, G.E., Schmidt, J.C., Lewis S.L. (2003). A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers. In: O'Connor, J.E., Grant, G.E. (Eds.) *A Peculiar River American*. Geophysical Union, Washington DC, 209–225.
- International Commission of Large Dams (ICOLD). (2007). *World Register of Dams*, Paris, France.
- Kondolf, G.M. (1997). Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environ. Manag.*, 21(4), 533–551.
- Li, D., Long, D., Zhao, J., Lu, H., Hong, Y. (2017). Observed changes in flow regimes in the Mekong River Basin. *J. Hydrol.*, 551, 217–232.
- Magilligan, F.J., Nislow, K.H. (2005). Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 71, 61–78.
- Nilsson, C., Reidy, C.A., Dynesius, M., Revenga, C. (2005). Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 308, 405–408.
- Obodovskij, A. (2002). Some methodological aspects of research of channel processes in the lower reaches (on the example of the Dnieper hydroelectric power stations). *Hydrology, Hydrochemistry and hydroecology*, 4, 106–111. [in Ukrainian]
- Obodovskij, A., Hrebin, V. (2001). Organization of monitoring of hydrological regime and channel processes of the Dnieper in the area of Kaniv Reserve. *Nature conservation in Ukraine*, 7, 1, 59–64. [in Ukrainian]
- Obodovskij, O., Hrebin, V., Onyshchuk, V., Pohorilchuk, N. (2006). Features of the development of channel processes in the waters of the lower reaches of the Kaniv hydroelectric power station. *Water management of Ukraine*, 5, 46–52. [in Ukrainian]
- Obodovskij, O., Habel, M., Szatten, D., Rozlach, Z., Babinski, Z., Maerker, M. (2020). Assessment of the Dnieper Alluvial Riverbed Stability Affected by Intervention Discharge Downstream of Kaniv Dam. *Water*, 12, 1104.
- Olden, J.D., Poff, N.L. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Res. Appl.*, 19, 101–121.
- Pegg, M., Pierce, C., Roy, A. (2003). Hydrological alteration along the Missouri River Basin: a time series approach. *Aquat. Sci.*, 65, 63–72.
- Poff, N.L., Olden, J.D., Merritt, D.M., Pepin, D.M. (2007). Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104, 5732–5737.
- Pyron, M., Neumann, K. (2008). Hydrologic alterations in the Wabash River watershed, USA. *River Res. Appl.*, 24, 1175–1184.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J., Braun, D.P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conserv. Biol.*, 10, 1163–1174.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Wigington, R., Braun, D.P. (1997). How much water does a river need? *Freshw. Biol.*, 37, 231–249.
- Richter, B.D., Warner, A.T., Meyer, J.L., Lutz, K. (2006). A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations. *River Res. Appl.*, 22, 297–318.
- Rinaldi, M. (2003). Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, Central Italy. *Earth Surf. Proc. Land.*, 28, 587–608.
- Słowik, M., Dezso, J., Marciniak, A., Toth, G., Kovacs, J. (2018). Evolution of river planforms downstream of dams: Effect of dam construction or earlier human-induced changes? *Earth Surf. Proc. Land.*, 43, 2045–2063.
- Smith, D.G., Smith, N.D. (1980). Sedimentation in anastomosed river system: example from alluvial valley Near Banff, Alberta. *J. Sedimentary Petrol.*, 50(1), 157–164.
- Szymańska, J.B., Gierszewski, P.J., Habel, M., Luc, M., Witkowski, K., Bortnyk, S., Obodovskij, O. (2021). Response of the Dnieper river fluvial system to the river erosion caused by the operation of the Kaniv hydro-electric power plant (Ukraine). *Catena*, 202, 105265.
- Timpe, K., Kaplan, D. (2017). The changing hydrology of a dammed Amazon. *Sci. Adv.*, 3(11), e1700611.
- TNC (The Nature Conservancy). (2001). *Indicators of Hydrologic Alteration User's Manual*.
- Torabi Haghighi, A., Kløve, B. (2013). Development of a general river regime index (RRI) for intra-annual flow variation based on the unit river concept and flow variation endpoints. *J. Hydrol.*, 503, 169–177.
- Vörösmarty, C.J., Sharma, K.P., Fekete, B.M., Copeland, A.H., Holden, J., Marble, J., Lough, J.A. (1997). The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. *Ambio*, 26, 210–219.
- Walling, D.E., Fang, D. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global Planet. Change*, 39, 111–126.
- Wang, Y., Rhoads, B.L., Wang, D. (2016). Assessment of the flow regime alterations in the middle reach of the Yangtze River associated with dam construction: potential ecological implications. *Hydrol. Process.*, 30, 3949–396.

Williams, G.P., Wolman, M.G. (1984). Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers. *Geological Survey Professional Paper*, 1286.

Zhang, Q., Gu, X., Singh, V.P., Xu, C.Y., Kong, D., Xiao, M., Chen, X. (2015). Homogenization of precipitation and flow regimes across China: changing properties, causes and implications. *J. Hydrol.*, 530, 462–475.

Zhang, Z., Huang, Y., Huang, J. (2016). Hydrologic alteration associated with dam construction in a medium-sized coastal watershed of Southeast China. *Water*, 8, 317.

Надійшла до редколегії 20.09.21

S. Bortnyk^{1,6}, Dr. Sci. (Geogr.), Prof.,
E-mail: sergiy.bortnyk@knu.ua;
O. Obodovskyi¹, Dr. Sci. (Geogr.), Prof.;

P. Gerszewski², Dr. hab.;

J. Szmanda³, Dr. hab.;

M. Luc⁴, Dr. hab.;

M. Habel⁵, PhD.;

K. Witkowski³, PhD.;

N. Pohorilchuk¹, PhD (Geogr.);

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine;

²Institute of Geography and Spatial Development,
Polish Academy of Sciences, Toruń, Poland;

³Pedagogical University, Krakow, Poland;

⁴Jagellonian University, Krakow, Poland;

⁵Kazimierz Wielki University, Bydgoszcz, Poland;

⁶Jan Kochanowski University, Kielce, Poland

THE REACTION OF ANASTOMOSING RIVER FLUVIAL SYSTEMS TO THE OPERATION OF A HYDROELECTRIC POWER PLANT

The operation of the hydroelectric power plant is one of the main reasons for the transformation of river runoff. The change in the hydrological regime affects several other processes taking place in the river channel, including the transformation of its geomorphological features. The article presents the impact of the Kaniv and Włocławek dams on the hydrological regime of the middle Dnieper River and the lower Vistula River. The nature and magnitude of changes in the Dnieper and The Vistula rivers flow regime caused by the functioning of the dams were determined using IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) and the RVA (The Range of Variability Approach) method. It was demonstrated that the operation of the hydroelectric power plant especially in the hydropeaking system is the cause of a large flow alteration in respect of the frequency and duration of low- and high-flow pulses and the rate and frequency of change in the flow. It was assessed how the change in flow conditions in connection with the deficit of sediments affected the transformation of the Vistula and Dnieper river channels downstream of the dams. Based on our results, the reaction of the fluvial system to changes in the flow regime caused by the operation of the Kaniv and Włocławek hydroelectric power plants consisted in: 1) changing the width and depth of channels; 2) changing the size of the forms separating channels; 3) fixation of the anastomosing fluvial system. More dynamic water flows due to the operation of hydroelectric power plants modify and dynamize the natural process of evolution of a fluvial system into an anastomosing system by causing the incision and narrowing of the main channels, because of which the side channels occupy a higher position above them. On the other hand, the equalization of the water flow in the channels causes a decrease in the water level and the disappearance of the flow in the side channels. As a result, the islands separated by these channels merge and inter-channel areas are formed.

Keywords: hydroelectric power plant, fluvial system, anastomosing river evolution, dam, erosion, Dnieper River, Vistula River.

С. Бортник^{1,6}, д-р геогр. наук, проф.,
E-mail: sergiy.bortnyk@knu.ua;

О. Ободовский¹, д-р геогр. наук, проф.;

П. Гершевский², д-р габилитованный;

Я. Шмандя³, д-р габилитованный;

М. Луц⁴, д-р габилитованный;

М. Хабель⁵, д-р философии;

К. Витковский³, д-р философии;

Н. Погорильчук¹, канд. геогр. наук, доц.;

¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, г. Киев, Украина;

²Институт географии и пространственного развития,
Польская академия наук, г. Торунь, Республика Польша;

³Педагогический университет имени Комиссии национального образования,
г. Краков, Республика Польша;

⁴Ягеллонский университет, г. Краков, Республика Польша;

⁵Университет Казимира Великого, г. Быдгощ, Республика Польша;

⁶Университет Яна Кухановского, г. Кельце, Республика Польша

РЕАКЦИЯ МНОГОРУКАВНЫХ РЕЧНЫХ СИСТЕМ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Эксплуатация гидроэлектростанции (ГЭС) является одной из основных причин трансформации речного стока. Изменение гидрологического режима влияет на ряд процессов, которые происходят в русле реки, в том числе на трансформацию ее геоморфологических особенностей. В статье освещено влияние Каневской и Влоцлавской дамб на гидрологический режим Среднего Днепра и Нижней Вислы. При помощи методов IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) и RVA (The Range of Variability Approach) определены характер и режим стока Днепра и Вислы, вызванные функционированием соответствующих дамб. Продемонстрировано, что работа ГЭС, особенно в каскаде, является причиной изменений уровня, скорости и вариативности потока. Оценено, как изменение условий стока, в связи с дефицитом наносов, повлияло на трансформацию русел Вислы и Днепра на участках, расположенных ниже дамб ГЭС. Полученные нами результаты показали, что реакция речной системы на изменение режима течения, обусловленного работой Каневской и Влоцлавской ГЭС, состоит в: 1) изменении ширины и глубины русла; 2) изменении размеров форм, которые разделяют отдельные протоки; 3) фиксации много рукавной речной системы. Более динамичные за счет работы ГЭС потоки воды модифицируют и ускоряют природный процесс эволюции извилистой речной системы в много рукавную, вызывая эрозию и сужение основных русел. Как следствие, боковые русла (протоки и разветвления) занимают более высокое гипсометрическое положение над основным руслом. Вместе с тем выравнивание потока воды в руслах вызывает и исчезновение потока в боковых руслах. В результате разрастаются острова, разделенные ранее этими потоками. Соединяясь между собой, они образуют широкие междуречные пространства и формы.

Ключевые слова: гидроэлектростанция, дамба, эрозия, речная система, русло, эволюция много рукавных русел, река Днепр, река Висла.