

## **Transformacja właściwości wody i osadów w profilu podłużnym zbiorników zaporowych Kaskady Górnej Wołgi\***

*Transformation of water and sediment properties along  
the longitudinal profile of the Upper Volga Cascade Reservoirs*

**PIOTR J. GIERSEWSKI**

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN  
87-100 Toruń, ul. Kopernika 19; piotr.gierszewski@geopan.torun.pl

**VIKTOR V. ZAKONNOV**

Instytut Biologii Wód Śródlądowych im. A.D. Papanina, 1  
52742 Borok, Rosja; ZAK@ibiw.yaroslavl.ru

**MICHAŁ KASZUBSKI, JAROSŁAW KORDOWSKI**

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN  
87-100 Toruń, ul. Kopernika 19; mkaszubski1@wp.pl; jaroslaw.kordowski@geopan.torun.pl

**Zarys treści.** Na przykładzie zbiorników zaporowych górnej Wołgi przedstawiono problem zmian właściwości fizyczno-chemicznych wody, zawiesiny i osadów dennych w profilu podłużnym zbiorników funkcjonujących w układzie kaskadowym. Wykazano, że również takie zbiorniki zachowują charakterystyczną trójdzielność, wyrażoną obecnością strefy rzecznej, przejściowej i jeziornej. Duża energia i siła erozyjna wód poniżej kolejnych zapór upodabnia te odcinki do stref rzecznych zbiorników funkcjonujących samodzielnie. Trójdzielność zbiorników widoczna jest przede wszystkim w zróżnicowaniu właściwości osadów dennych, mniej wyraźnie zaznacza się w odniesieniu do cech fizyczno-chemicznych wody. Podobny skład i wielkość mineralizacji wód powyżej i poniżej zapór świadczy jednak o istnieniu ciągłości hydrochemicznej między zbiornikami. Wyniki badań zbiorników tworzących Kaskadę Górnej Wołgi wykazały, że tworzą one spójny system, funkcjonujący jako swego rodzaju kontinuum zbiorników.

**Słowa kluczowe:** kaskada zbiorników zaporowych, nieciągłość rzeki, rumowisko rzeczne, górna Wołga, Rosja.

---

\* Badania przeprowadzono w ramach projektu „Procesy sedymentacyjne w zbiornikach zaporowych na przykładzie zbiornika ugliczkiego i włocławskiego”, realizowanego na podstawie umowy między Polską Akademią Nauk i Rosyjską Akademią Nauk.

Praca finansowana ze środków przyznanych na realizację projektu międzynarodowego współfinansowanego (Umowa 3500/ICLEA/15/2016/0).

## Wprowadzenie

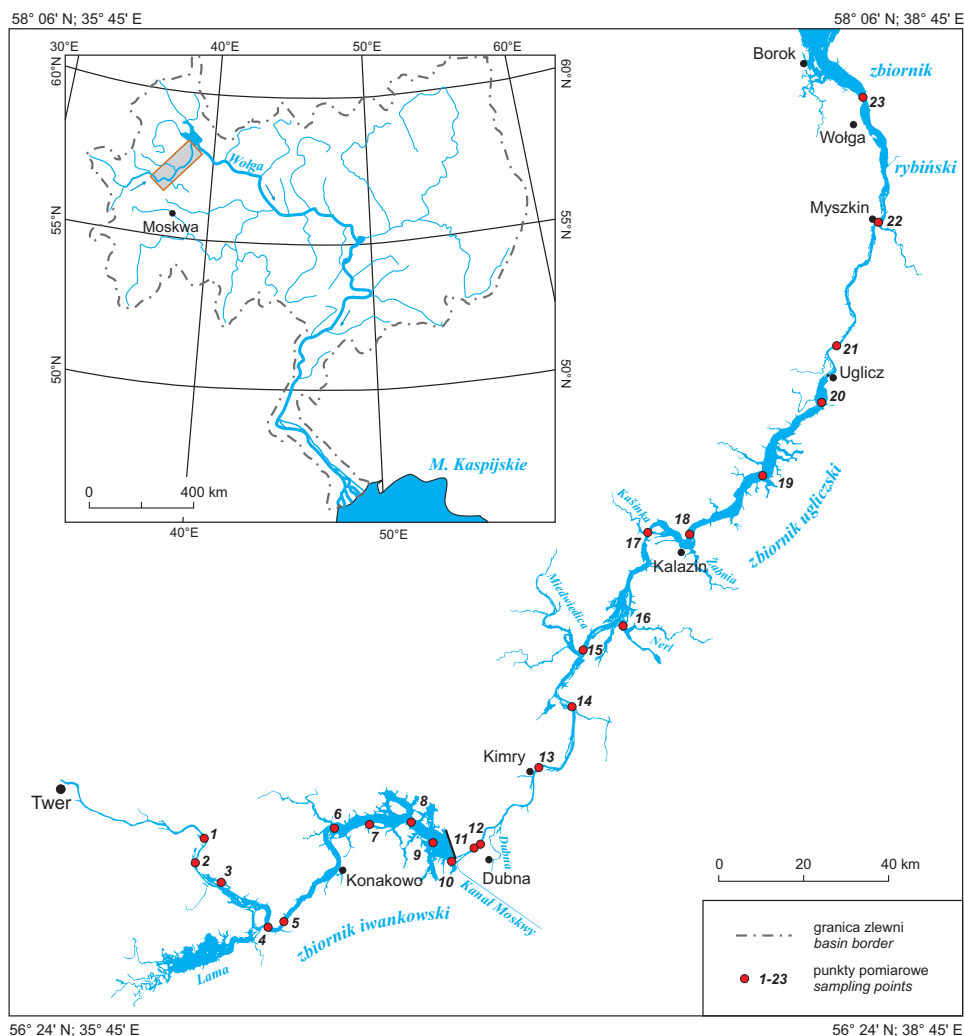
Rzeki to złożone i bardzo dynamiczne ekosystemy, w których komponenty abiotyczne i biotyczne wchodząc we wzajemne interakcje zmieniają się stopniowo od źródeł do ujścia. Relacje między czynnikami abiotycznymi wpływające na zachowanie ciągłości procesów fluwialnych w skali zlewni rzecznej zostały opisane i przedstawione w formie modeli geomorfologicznych (Schumm, 1977). Modele te stały się później podstawą do opracowania ekologicznych koncepcji funkcjonowania rzek, w tym między innymi koncepcji kontinuum rzeczno- (River Continuum Concept – RCC) (Vannote i inni, 1980). W związku z działaniem wielu czynników i procesów naturalnych i antropogenicznych zakłócających ciągłość i strefowość ekosystemów rzecznych, alternatywą dla RCC stała się koncepcja nieciągłości seryjnej (Serial Discontinuity Concept – SDC) (Ward i Stanford, 1995). Uwzględnia ona wpływ oddziaływań w wymiarze lateralnym i wertykalnym na zmiany właściwości ekosystemu rzeczno- w profilu podłużnym.

Najbardziej spektakularnym przykładem przerwania ciągłości ekosystemu rzeki jest spiętrzenie jej wód zaporą. Według koncepcji SDC funkcjonowanie zapory przesuwają kontinuum w kierunku ujścia rzeki. Zmiany wynikające z oddziaływania zapór i zbiorników zaporowych na środowisko rzeki mają charakter kompleksowy i widoczne są zarówno powyżej, jak i poniżej spiętrzenia (McCartney i inni, 2001). Do najważniejszych skutków oddziaływania zapór na środowisko należą przekształcenia morfologii koryta rzeczno- (m.in. Babiński, 1992; Alexeevsky i inni, 2013; Habel, 2013; Gierszewski i inni, 2015) oraz zmiany jakości wody, ustroju termicznego i hydrologicznego rzek (m.in. Palmer i O’Keeffe, 1990; Gierszewski, 2004; Magilligan i Nislov, 2005). Największe zmiany widoczne są powyżej zapór, gdzie następuje większe lub mniejsze przekształcenie warunków rzecznych w jeziorne. Spadek prędkości przepływu wody w kierunku zapory jest jedną z głównych przyczyn zmian właściwości fizycznych i chemicznych wody, wielkości koncentracji i cech zawiesiny oraz właściwości osadów dennych. Charakter i wielkość tych zmian zależy od miejsca lokalizacji zapory w systemie hydrograficznym, relacji wielkości zlewni do wielkości zbiornika, parametrów morfometrycznych zbiornika oraz warunków jego eksploatacji. Stopień transformacji poszczególnych form rumowiska rzeczno- jest proporcjonalny do stopnia przekształcenia warunków rzecznych w jeziorne. Jego wyrazem jest typowa dla zbiorników zaporowych strefowość, którą tworzą trzy charakterystyczne odcinki: rzeczny, przejściowy i jeziorny (Kimmel i Groeger, 1984). Strefowość środowiska w zbiorniku zaporowym dotyczy nie tylko zróżnicowania właściwości fizyczno-chemicznych wody i produktywności biologicznej, ale również zróżnicowania właściwości osadów dennych (Morris i Fan, 1998).

Na tle dobrego rozpoznania wpływu pojedynczych zbiorników zaporowych na funkcjonowanie ekosystemu rzecznoego znacznie mniej wiemy w tym zakresie w odniesieniu do kaskad zbiorników zaporowych (Straškraba, 1990; Miranda i inni, 2008). Przeprowadzone do tej pory badania dotyczące transformacji abiotycznych i biotycznych właściwości środowiska wodnego wzdłuż kaskady zbiorników wskazują, że poszczególne zbiorniki tworzące kaskadę powinny być traktowane jako elementy systemu rzecznoego powiązane siecią różnych zależności (Barbosa i inni, 1999; Callisto i inni, 2005; Silva i inni, 2005; Chick i inni, 2006; Miranda i inni, 2008). W cytowanych wyżej pracach zwraca się uwagę, że stan ekosystemu określonego zbiornika w kaskadzie, zachodzące w nim procesy biologiczne oraz struktura zasiedlających go organizmów są skutkiem zmian dokonujących się w zbiornikach położonych wyżej. W górnym zbiorniku kaskady większe jest również przekształcenie charakterystyk limnologicznych (Miranda i inni, 2008). W drugim i kolejnych zbiornikach zaobserwowano między innymi zmniejszenie się zasięgu strefy rzecznej i przejściowej (Smith i inni, 2014). W niektórych kaskadach stwierdzana jest poprawa jakości wody w dół systemu w zakresie różnych parametrów fizycznych i chemicznych (Straškraba, 1994; Callisto i inni, 2005), co może się przekładać również na gradientowe zmiany struktury i liczebności hydrobiontów (Smith i inni, 2014). Syntetycznym opisem zmian właściwości środowiska wodnego wzdłuż kaskady zbiorników jest koncepcja Cascading Reservoir Continuum, (CRCC), sformułowana na podstawie badań kaskady zbiorników na rzece Tietê w Brazylii (Barbosa i inni, 1999).

Największą w Europie kaskadą zbiorników zaporowych jest Kaskada Wołgi, którą tworzy osiem akwenów o całkowitej powierzchni 18 765 km<sup>2</sup> i pojemności 139 km<sup>3</sup> (Litvinov i inni, 2009). Przedstawione w artykule wyniki badań dotyczą zbiorników iwankowskiego (IR) i ugliczskiego (UR), które są pierwszymi elementami kaskady Wołgi. Do badań włączono również basen wołżański, będący rzecznoym odcinkiem zbiornika rybińskiego (VP-RR) (ryc. 1).

Zbiorniki Kaskady Górnej Wołgi były najczęściej traktowane jak niezależne obiekty funkcjonujące w systemie, a rzadziej jako jego składniki powiązane siecią zależności z sąsiednimi zbiornikami (Bikbulatov i inni, 2001). Celem badań przeprowadzonych w 2012 r. była ocena charakteru i wielkości zmian fizycznych i chemicznych cech wody oraz niektórych właściwości zawiesiny i osadów dennych w profilu podłużnym kaskady oraz charakterystyka mechanizmów transformacji rumowiska rzecznoego w kolejnych zbiornikach tworzących kaskadę. Wyniki badań stały się podstawą do oceny powiązań między poszczególnymi zbiornikami oraz integralności całego układu.



Ryc. 1. Kaskada Górnej Wołgi – część objęta badaniami

The Upper Volga Cascade and study areas thereof

Opracowanie własne, podobnie pozostałe ryciny / Authors' own elaboration,  
as with the remaining figures.

## Obszar badań

Zbiorniki iwankowski (IR) i ugliczski (UR) są najmniejszymi elementami tworzącymi Kaskadę Wołgi. Podobnie jak większość nizinnych zbiorników zaporowych zaliczają się do płytkich akwenów typu polimiktycznego. W porównaniu z innymi zbiornikami Kaskady Wołgi charakteryzuje je przeciętne tempo wymia-

ny wody, odpowiednio 46 i 37 dni. Cechy morfometryczne zbiorników, ustrój hydrologiczny i sposób eksploatacji wpływają na dużą dynamikę wody w zbiornikach, co sprzyja recyrkulacji materii zakumulowanej w zbiornikach (tab. 1).

Tabela 1. Charakterystyki morfometryczne zbiorników zaporowych kaskady Wołgi  
Morphometric characteristics of the dam reservoirs forming the Volga Cascade

Zbiornik <i>Reservoir</i>	Rok napełnienia <i>Year of filling</i>	V	S	$S_{sw}$	L	$W_{max}$	$H_{max}$	$H_{avg}$	$C_w$
Iwankowski (IR)	1937	1,1	327	58,4	120	8	19	3,4	7.9
Ugliczski (UR)	1940	1,2	249	43,4	143	5	23	4,8	9.0
Rybiński (RR)	1941	25,5	4550	56,1	250	56	30	5,6	1.9
Gorkowski	1955	8,7	1580	49,0	430	15	22	5,5	6.1
Czeboksarski	1981	5,2	1200	53,1	340	9	23	4,3	19.8
Kujbyszewski	1955	52,5	5900	32,6	484	40	41	8,9	5.2
Saratowski	1967	13,4	1833	36,4	336	20	33	7,3	18.2
Wołgogradzki	1958	31,6	3126	22,4	546	17	41	10,1	8.2

V – pojemność / volume ( $\text{km}^3$ ) S – powierzchnia /area ( $\text{km}^2$ ),  $S_{sw}$  – odsetek powierzchni płytkowodnych / percentage of shallow water, L – długość / length (km),  $W_{max}$  – szerokość maksymalna / maximum width (km),  $H_{max}$  – maksymalna głębokość / maximum depth (m),  $H_{avg}$  – średnia głębokość / mean depth (m),  $C_w$  – współczynnik wymiany wody (rok<sup>-1</sup>) / water exchange coefficient (year<sup>-1</sup>) (wg / after to Edelstein, 1998).

Kaskada Górnej Wołgi położona jest w granicach Niziny Górnowołżańskiej. Obszar zlewni o wysokościach 100-300 m n.p.m. ukształtowany został przez lądolód stadium moskiewskiego zlodowacenia Dniepru oraz późniejszą aktywność procesów erozyjnych i denudacyjnych. Rzeźbę zlewni charakteryzuje naprzemienne występowanie płaskich równin typu aluwialno-sandrowego i jeziorno-lodowcowego, a także falistych bądź lekko pagórkowatych równin morenowych z pojedynczymi wzgórzami (Velichko i inni, 2004). Aż 58% powierzchni zlewni górnej Wołgi zajmują lasy. Ważną formą użytkowania terenu są również łąki i obszary podmokłe, na które przypada około 18% powierzchni zlewni (Litvinov, i inni, 2009). Równinna rzeźba, przewaga terenów leśnych oraz małe zasoby soli podatnych na ługowanie w utworach powierzchniowych są powodem ograniczonej dostawy materiału rozpuszczonego i klastycznego do koryt rzecznych. W cechującej się umiarkowaniem kontynentalnym klimatem zlewni górnej Wołgi roczna suma opadów osiąga 700-800 mm. Z punktu widzenia formowania się zasobów wodnych istotne znaczenie mają wody zawarte w pokrywie śnieżnej – mogą stanowić nawet 25% sumy rocznej. Pokrywa śnieżna w zlewni górnej Wołgi osiąga grubość do 160 cm i zalega od trzeciej dekady listopada do pierwszej dekady kwietnia (Georgievskij, 2015). Woda zgromadzona w pokrywie śnieżnej jest przyczyną dużych wiosennych wezbrań roztopowych, w czasie których z różnych

części zlewni odpływa od 50 do 70% sumy odpływu rocznego. Najniższe odpływy, około 15% sumy rocznej, występują w miesiącach zimowych. Udział zasilania górnej Wołgi wodami podziemnymi szacowany jest na około 30% (Georgievskij, 2015). Zabudowa Wołgi kaskadą zbiorników zaporowych spowodowała redukcję wezbrania wiosennego i nieznaczny wzrost letnio-zimowych przepływów niżówkowych, co przełożyło się na zmniejszenie rocznego zakresu zmienności przepływów rzeki. Charakter zmian ustroju hydrologicznego, a w konsekwencji również innych procesów fluwialnych zależy od funkcji i sposobu eksploatacji zbiorników zaporowych. IR i UR charakteryzuje trzyfazowy przebieg eksploatacji. Po napełnianiu zbiornika wiosną, następuje okres powolnego zrzutu wody w sezonie nawigacyjnym, a następnie faza szybkiego odpływu wody w miesiącach zimowych (Ėdelštejn, 1998). Taki sposób eksploatacji zbiornika jest przyczyną dużych rocznych wahań stanów wody, które w zbiornikach iwankowskim i ugliczkim wynoszą od 4,5 do 7,5 m (Ėdelštejn, 1998). Duże wahania poziomu wody wpływają na intensywną abrazję brzegów oraz okresowe zwiększenie powierzchni obszarów dna zbiorników, gdzie osady podlegają resuspensji i erozji. Według N. Butorina (1978), aż 50% powierzchni dna IR podlega oddziaływaniu fal. Duże znaczenie w procesach transformacji materii dopływającej do zbiornika ma tempo wymiany wody – w IR i UR wynosi ono średnio od 20 do 70 dni (Ėdelštejn, 1998). Jeżeli weźmie się pod uwagę wpływ procesów hydrodynamicznych odpowiedzialnych za mieszanie się mas wodnych różnego pochodzenia to rzeczywisty czas przebywania wody w zbiornikach znacznie się wydłuży. Po uwzględnieniu tych czynników całkowita wymiana wiosennej masy wodnej w IR może trwać nawet dziewięć miesięcy, a w UR dziesięć (Stefan, 1980).

## Metody badań

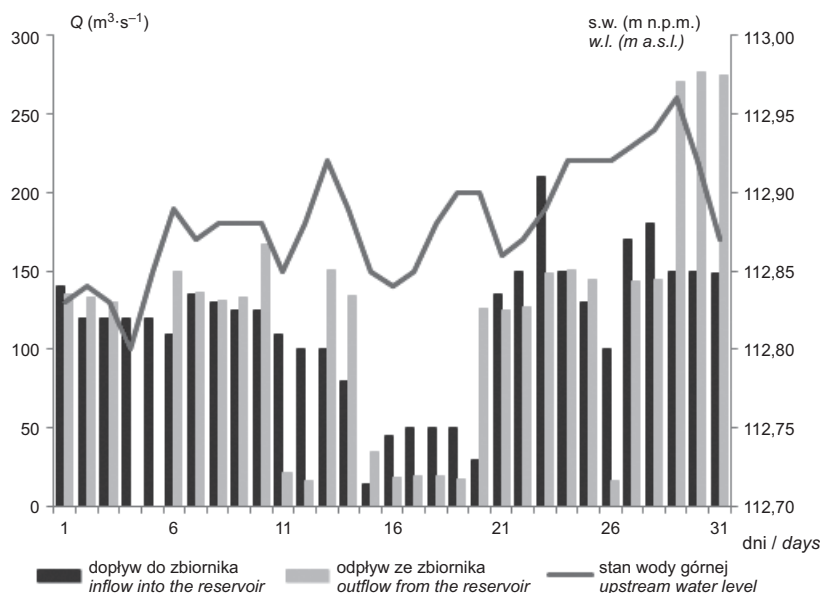
Badania różnicowania właściwości wody i osadów dennych w profilu podłużnym kaskady zbiorników górnej Wołgi przeprowadzono w dniach 8-12 sierpnia 2012 r. na odcinku o długości około 300 km między miejscowościami Lisitsa nad IR i Wołga nad VP-RR (ryc. 1). W 23 punktach pomiarowych (pp.) zlokalizowanych na linii zatopionego koryta Wołgi, w miejscach odzwierciedlających różne warunki morfologiczne i hydrodynamiczne zbiorników, pobrano próbki wody i osadów dennych. Skład jonowy wody oraz koncentrację i właściwości zawiesiny określono w próbkach pobranych z całej warstwy wody za pomocą batometru. Temperaturę, przewodnictwo elektrolityczne i koncentrację tlenu zmierzono w terenie w przypowierzchniowej warstwie wody i nad dnem za pomocą sondy produkcji firmy WTW. Przezroczystość wody została określona na podstawie pomiaru widzialności białego krążka Secchiego o średnicy 30 cm. Skład jonowy wody oznaczono standardowymi metodami analitycznymi: titrometryczną ( $\text{HCO}_3^-$ ) i chromatografii jonowej ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ). Koncentrację zawiesiny w próbce wody o objętości  $5 \text{ dm}^3$  określono bez-

pośrednio po pobraniu metodą sączkowo-wagową. Organiczną składową zawiesiny i zawartość materii organicznej w próbkach osadów dennych oznaczono jako stratę po prażeniu w temperaturze 550°C. Próbkę osadów dennych zostały podjęte z powierzchni dna próbnikiem typu Van Veena. Uziarnienie zawiesiny klastycznej i osadów dennych określono na laserowym mierniku wielkości cząstek Fritsch-Analysette 22.

Wyniki analiz uziarnienia zostały opracowane statystycznie za pomocą oprogramowania GRADISTAT (Blott i Pye, 2001), które posłużyło do obliczenia wskaźników uziarnienia według R.L. Folka i W.C. Warda (1957). Do obliczeń hydrochemicznych wykorzystano program AQUACHEM® (Waterloo Hydrogeologic).

## Wyniki badań

Średni miesięczny dopływ wody do zapory UR w sierpniu 2012 roku był wyraźnie niższy od średniego wieloletniego ( $233 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) i wynosił  $113 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . W całym 2012 r. był on jednak o około 17% większy od wartości wieloletniej. W okresie badań dopływy wody do zbiornika zmniejszały się od 130 do  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (ryc. 2). Z przebiegu warunków hydrologicznych wynika, że wielkości charakterystyk opi-



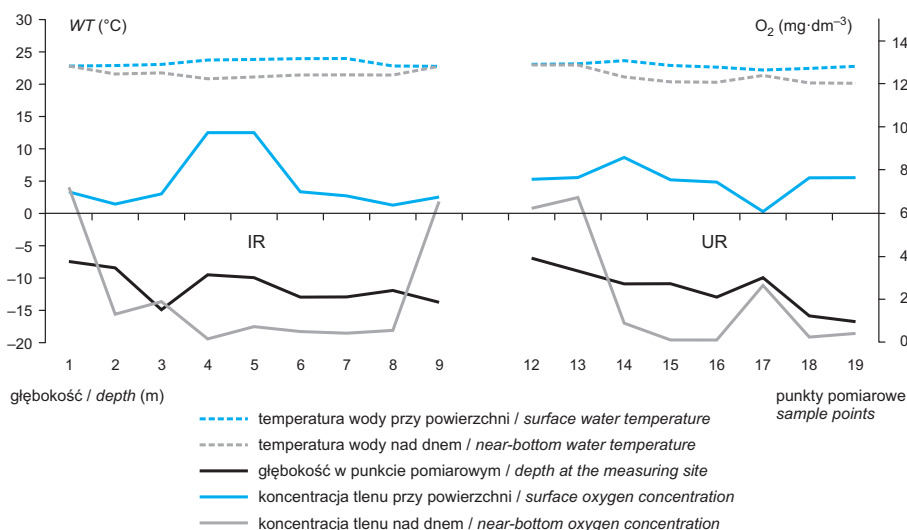
Ryc. 2. Wielkości przepływów (Q) i stanów wody (s.w.) Wołgi w profilu zapory Uglicz w sierpniu 2012 r.

Flow rates (Q) and water levels (w.l.) in the Volga at the Uglich Dam in August 2012



sujących właściwości wody i zawiesiny odzwierciedlają sytuację charakterystyczną dla przepływów niżówkowych.

Temperatura wody w badanych zbiornikach wykazywała niewielkie zróżnicowanie zarówno w profilu podłużnym, jak i w pionie (ryc. 3). W przypowierzchniowej warstwie wody wynosiło ono zaledwie  $1,7^{\circ}\text{C}$ , a przy dnie  $3^{\circ}\text{C}$ . Największe różnice temperatury w pionie sięgały  $2,9^{\circ}\text{C}$  i występowały w środkowych i dolnych odcinkach zbiorników. Średnia wartość temperatury wody przy dnie dla całego odcinka kaskady była tylko o  $1,7^{\circ}\text{C}$  niższa niż w warstwie powierzchniowej, gdzie wynosiła  $23,1^{\circ}\text{C}$ .



Ryc. 3. Przebieg temperatury wody (WT) i koncentracji tlenu rozpuszczonego (O<sub>2</sub>) w profilu podłużnym zbiorników w dniach 8-11 sierpnia 2012 r.

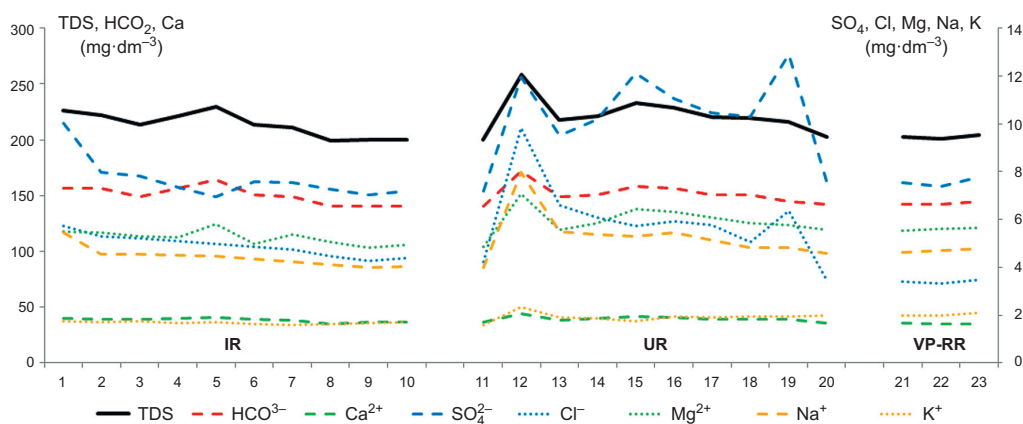
Courses for water temperature (WT) and the concentration of dissolved oxygen (O<sub>2</sub>) along the longitudinal profile of the reservoirs: 8-11 August 2012

Zdecydowanie większe było zróżnicowanie natlenienia wody. Przy powierzchni koncentracja tlenu wynosiła od  $6,1$  do  $9,7 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ , co oznacza saturację na poziomie od 70 do 115%. Poniżej ujścia rzeki Lamy do IR zaobserwowano skokowy wzrost koncentracji tlenu o  $3,8 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ , a następnie jego spadek do wartości początkowych (ryc. 3). Poza obszarami o dużej dynamice wody, natlenienie wody nad dnem było bardzo słabe. Biorąc pod uwagę cały analizowany fragment kaskady nie przekraczało ono w takich miejscach  $2,1 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ , a w wielu było niższe i nie osiągało nawet  $0,5 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$  (ryc. 3).

Średnia wielkość zasolenia wody w zbiornikach górnej Wołgi wynosiła w okresie badań  $216 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ . Najślabiej zmineralizowane wody stwierdzono w dol-



nej części IR (199  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ ), a najbardziej w górnej części UR (258  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ ), poniżej ujścia rzeki Dubna. Na tle nieznacznego, ale systematycznego spadku mineralizacji wody w kierunku zapory IR, dość wyraźny był skokowy wzrost zasolenia wody poniżej ujścia rzeki Lama do tego zbiornika. Podobną sytuację zaobserwowano w UR, gdzie poniżej ujść dopływów (Dubna, Miedwedica, Nerl, Kaśinka i Żabnia) ogólna mineralizacja wody również lokalnie wzrastała (ryc. 4). W porównaniu z wynikami badań hydrochemicznych z innych okresów letnich wartości z roku 2012 są porównywalne z mineralizacją w roku 1997 (Bikbulatov, 2001) i nieco wyższe niż w 2009 i 2011 (Debolskij i inni, 2014).

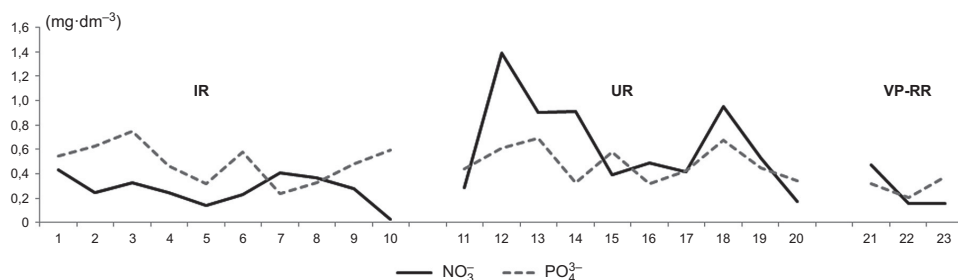


Ryc. 4. Zróżnicowanie wielkości stężeń jonów podstawowych w wodzie zbiorników kaskady górnej Wołgi na tle ich całkowitej mineralizacji (TDS) w dniach 8-11 sierpnia 2012 r.

Variation in concentrations of the main ions in the water of the Upper Volga Cascade Reservoirs as set against against their total mineralisation (TDS): 8-11 August 2012

Pod względem struktury składu jonowego badane próbki wody były jednorodne i reprezentowały typ wodorowęglanowo-wapniowy. Zmiany wielkości stężeń większości jonów głównych w profilu podłużnym kaskady nawiązywały do zmian mineralizacji ogólnej (ryc. 4). Nieznacznie mniejszą zgodność z przebiegiem mineralizacji ogólnej wykazywały jony potasowe i siarczanowe (ryc. 4). Ogólnie, stężenia poszczególnych jonów, a w efekcie również mineralizację ogólną, charakteryzuje małe zróżnicowanie. Wyrażają to niskie wartości współczynników zmienności ( $cv$ ), wynoszące od 6% do 10% w przypadku jonów wodorowęglanowych, wapniowych, magnezowych i potasowych i tylko nieco większe – jonów chlorkowych, siarczanowych i sodowych ( $cv = 17\text{-}27\%$ ). Należy podkreślić, że średnia wielkość ogólnej mineralizacji wody oraz wartości koncentracji poszczególnych jonów były nieco większe w UR.

Na tle względnie stabilnych stężeń jonów głównych, większe zróżnicowanie dotyczyło stężenia jonów fosforanowych ( $cv = 33\%$ ), a szczególnie azotanowych ( $cv = 71\%$ ). Zmiany ich koncentracji, w jeszcze większym stopniu niż było to w przypadku jonów głównych, zależą od dostawy dopływami bocznymi (ryc. 5). O ile średnia koncentracja fosforanów w obu zbiornikach była podobna, o tyle stężenia azotanów były o ponad 100% większe w UR. Stężenia azotanów stwierdzone w sierpniu 2012 r. były porównywalne z wartościami z lat 2009-2011 (Debolskij i inni, 2014). W przypadku jonów ortofosforanowych tylko ich najwyższe stężenia w zakresie od 0,6 do 0,75  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$  były wyższe od stężeń stwierdzonych w IR w latach wcześniejszych, kiedy nie przekraczały 0,54  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$  (Grigorjeva, 2012).

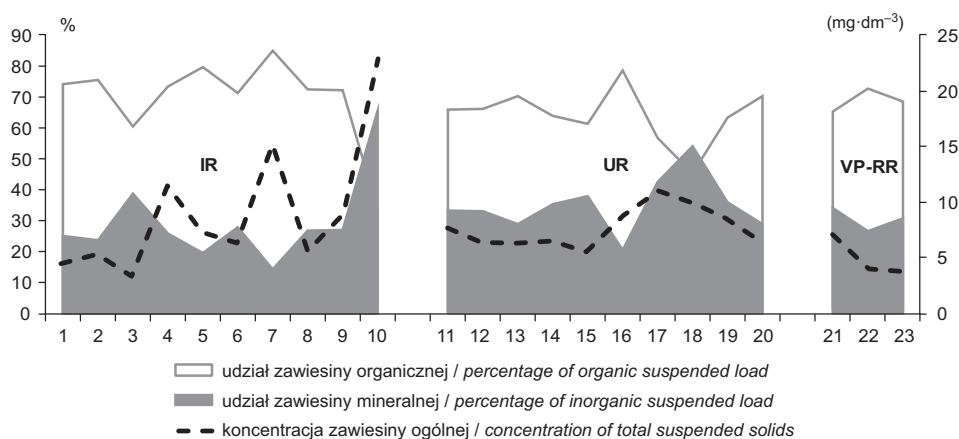


Ryc. 5. Zróżnicowanie wielkości stężeń azotanów i fosforanów w wodzie zbiorników kaskady górnej Wołgi w dniach 8-11 sierpnia 2012 r.

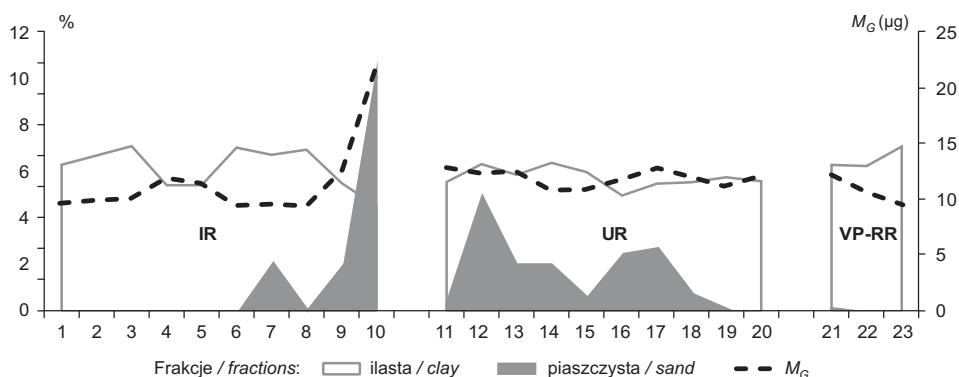
Variation in concentrations of nitrates and phosphates in the water of the Upper Volga Cascade Reservoirs: 8-11 August 2012

Duże zróżnicowanie, szczególnie w profilu podłużnym IR, charakteryzowało koncentrację zawiesiny ogólnej, o czym świadczy wartość współczynnika zmienności 54%. Najmniejszą wartość zmacenia (3,2  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ ) stwierdzono w górnej części IR, a największą (22,8  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ ) w dolnej części tego zbiornika (ryc. 6). Zawiesina składała się przede wszystkim z materiału organicznego, którego średnia zawartość wynosiła aż 67,6% (ryc. 6). Przewagę frakcji mineralnej stwierdzono tylko w dwóch próbkach pobranych w miejscach o większej dynamice wody spowodowanej intensywną żegluga na odcinku Kanał im. Moskwy – śluza IR oraz poniżej ujścia rzeki Żabnia do UR (ryc. 6). Duża zgodność przebiegu koncentracji zawiesiny ogólnej ( $r = -0,74$ ) świadczy o dominującym wpływie zawiesiny ogólnej na warunki świetlne w badanych akwenach.

Materiał mineralny transportowany w zawiesinie był jednorodny pod względem uziarnienia (ryc. 7). W prawie wszystkich próbkach zawiesina miała charakter mułkowy, z wyjątkiem próbki 10 pobranej w przysaporowej części IR na fragmencie drogi wodnej prowadzącej do kanału im. Moskwy, gdzie miała cechy



Ryc. 6. Struktura i wielkości koncentracji zawiesiny ogólnej  
Structure and concentration of total suspended solids

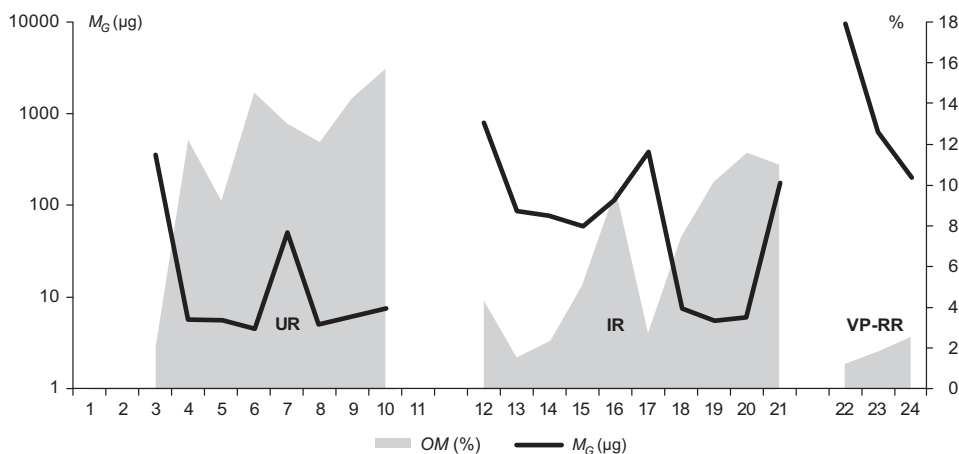


Ryc. 7. Udział frakcji oraz średnia średnica ziarna ( $M_G$ ) w próbkach zawiesiny  
Percentage of fractions as well as mean grain size ( $M_G$ ) in the suspension samples

mułkowo-piaszczyste. O małym zróżnicowaniu uziarnienia zawiesiny świadczy również zakres wartości średniej średnicy ziarna ( $M_G$ ), który wynosi od 9,4 do 13,4  $\mu\text{m}$ . Wielkości te odpowiadają frakcji mułków średnioziarnistych, a w przypadku próbki 10 mułków gruboziarnistych ( $M_G=21,2 \mu\text{m}$ ) (ryc. 7). Wysortowanie ( $\sigma_G$ ) materiału mineralnego było słabe we wszystkich próbkach zawiesiny i wynosiło od 2,32 do 2,83. Zróżnicowanie zawiesiny mineralnej w profilu podłużnym kaskady najlepiej wyraża udział frakcji piaszczystej – wyraźnie większy w próbkach pochodzących z dolnej części IR oraz górnej i środkowej części UR (ryc. 7).

W związku z lokalizacją miejsca poboru próbek osadów dennych na linii szlaku żeglugowego możliwa jest tylko ogólna charakterystyka zróżnicowania

właściwości osadów dennych w badanych zbiornikach. Obecność tzw. twardego dna oraz gruboziarnistych osadów uniemożliwiła pobranie próbek w trzech miejscach, ze względu na techniczne ograniczenia próbnika. Za każdym razem ujawniono tam jednak materiał żwirowo-piaszczysty. Mimo tych ograniczeń uzyskane wyniki odzwierciedlają cechy zróżnicowania osadów w profilu podłużnym kaskady. Uziarnienie próbek osadów dennych wykazywało bardzo duże zróżnicowanie, co wyraża zakres wartości średniej średnicy ziarna ( $M_G$ ) od 4,5 do 9818  $\mu\text{m}$  (ryc. 8). Pobrany materiał reprezentuje aż sześć typów osadów: żwiry, piaski żwirowe, piaski, diamiktony, piaski mułkowe i mułki, przeważają jednak osady mułkowe i piaszczysto-mułkowe, które stwierdzono łącznie w 67% próbek. W pozostałych występowały osady piaszczysto-żwirowe i diamikton. Wysortowanie osadów jest słabe i bardzo słabe ( $\sigma_G = 2,02\text{--}6,03$ ). Takie cechy stwierdzono aż w 83% próbek. Tylko w trzech próbkach reprezentujących osady piaszczyste i żwirowe, które pobrano w górnej części IR oraz VP-RR wysortowanie osadu było umiarkowane i dobre ( $\sigma_I = 1,87\text{--}0,66$ ).



Ryc. 8. Zawartość materii organicznej (OM) i średnia średnica ziarna ( $M_G$ ) w osadach dennych.  
Contents of organic matter (OM) and mean grain-size values ( $M_G$ ) in bottom sediments.

Występujące w górnej części zbiornika iwanowskiego osady piaszczyste (piaski średnioziarniste) stosunkowo szybko ustępują miejsca drobnodziarnistym mułkom. Te dominujące w IR osady, charakteryzujące spokojną sedimentację zawiesinową, zanikają lokalnie m.in. na wysokości miejscowości Korczewa (pp. 7), gdzie stwierdzono obecność grubszych osadów mułkowych oraz w pobliżu zapory IR, gdzie na wysokości śluzy i wejścia do kanału im. Moskwy zalegają osady piaszczysto-żwirowe (ryc. 8). W zbiorniku ugliczkim, na odcinku o długości około 80 km poniżej zapory w Dubnej, występują osady piaszczyste.

Początkowo jest to piasek gruboziarnisty, a dalej w dół zbiornika na przemian osady o charakterze piaszczysto mułkowym oraz drobno- i średnioziarniste piaszki. Dopiero poniżej ujścia rzeki Kaśinki (pp. 18) w osadach dominują ponownie mułki (ryc. 8). W przyzaporowej części UR, podobnie jak miało to miejsce w IR, stwierdzono osady grubsze w postaci piaszków mułkowych. Poniżej zapory w Ugliczu kompleks osadowy tworzą początkowo żwiry, a następnie osady piaszczyste.

Pobrane próbki osadów zawierają od 1,2 do 15,7% materiału organicznego. Jego zawartość wzrasta dość wyraźnie w kierunku zapór zbiorników (ryc. 8). Lokalne zmiany zawartości materii organicznej uwarunkowane są przede wszystkim zróżnicowaniem litologicznym osadów, co w praktyce oznacza większy udział materii organicznej w osadach bardziej drobnoziarnistych.

## **Dyskusja wyników badań**

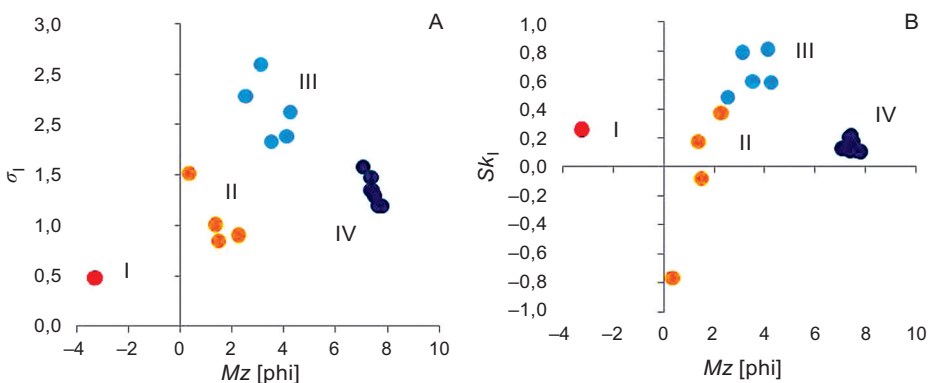
Najważniejszymi czynnikami wpływającymi na zróżnicowanie właściwości wody, zawiesiny i osadów dennych w zbiornikach zaporowych są procesy hydrodynamiczne (Kim i inni, 1983; Edelštejn, 1998; Dubnyak i Timchenko, 2000; Zakonnov i Poddubnyj, 2002; Lindim i inni, 2011). Spadek prędkości przepływu w kierunku zapory jest przyczyną zmian wielkości koncentracji zawiesiny mineralnej oraz cech litologicznych osadów dennych (Morris i Fan, 1998; Gierszewski, 2011; Frémion i inni, 2016). Falowanie oraz formująca się pod wpływem wiatru cyrkulacja prądowa powoduje resuspensję i redepozycję osadów, co w efekcie prowadzi do dalszych przekształceń ich właściwości, a także lokalnych zmian wielkości zmacenia wody (Bailey i Hamilton, 1997; Gierszewski i inni, 2006). Największy wpływ na wielkość i szybkość transformacji właściwości fizyczno-chemicznych wód rzecznych w zbiornikach zaporowych ma długość czasu retencji wody (Kawara i inni, 1998). Ten sam czynnik w połączeniu z innymi zjawiskami hydrodynamicznymi odpowiada za zmiany wielkości biologicznej produktywności w zbiornikach zaporowych (Straskraba, 1999).

Badania przeprowadzone w 2012 r., a także wcześniejsze wykazały, że procesy hydrodynamiczne są najważniejszymi czynnikami kształtującymi właściwości środowiska wodnego także w przypadku zbiorników tworzących Kaskadę Górnej Wołgi (Zakonnov, 1995; Bikbulatov i inni, 2001; Kopylov, red., 2001; Zakonnov i Poddubnyj, 2002).

Większa dynamika wody w górnych odcinkach zbiorników, które znajdują się w zasięgu albo oddziaływania prądu przepływowego Wołgi (IR), albo zrzutów wody z wyższego zbiornika w kaskadzie, wpływa na lepsze wymieszanie wody – w efekcie następuje wyrównanie jej temperatury oraz wzrost natlenienia nad dnem (ryc. 3). Podobną strukturę termiczną i tlenową stwierdzono również w przyzaporowym fragmencie IR, gdzie funkcjonowanie śluzy oraz odpływ części wód, około 18% rozchodowej części bilansu wodnego zbiornika, do kanału im. Moskwy wpływa na większą dynamikę wody.

Spadek prędkości przepływu w kierunku zapory jest główną przyczyną zróżnicowania właściwości osadów dennych. W efekcie, w dolnych częściach zbiorników dominują osady bardziej drobnozziarniste z większą zawartością materii organicznej (Banach, 1985; Morris i Fan, 1998). Oprócz spadku prędkości przepływu wody w kierunku zapory istotny wpływ na sposób wykształcenia osadów dennych ma również prędkość i układ prądów, głębokość i morfologia dna zbiornika, a także właściwości materiału klastycznego dostarczanego do zbiornika z różnych źródeł (Zakonnov, 1995; Abraham i inni, 1999; Gierszewski i inni, 2006). Wpływ dynamiki wód na przebieg transportu i warunki depozycji materiału klastycznego znajduje odzwierciedlenie w charakterze zależności między wskaźnikami uziarnienia osadu wyliczonymi według wzorów R.L. Folk'a i W.C. Warda (1957). Istotnych informacji o tym dostarcza analiza relacji między średnią średnicą ziarna i wysortowaniem oraz średnią średnicą i skośnością rozkładu ziaren (Mycielska-Dowgiałło i Ludwikowska-Kędzia, 2011). Układ punktów na wykresie rozrzutu średniej średnicy ziarna i wysortowania tworzy cztery zgrupowania, z których jedno (zgrupowanie I) odnosi się do pojedynczej próbki pobranej w VP-RR (ryc. 9A). Jest to próbka osadów żwirowych o dobrym wysortowaniu, charakterystyczna dla warunków środowiska wysokoenergetycznego. Dodatnie wartości skośności w przypadku frakcji gruboziarnistej mogą świadczyć o warunkach erozyjnych (ryc. 9B) (McLaren, 1981). Dużą energię wody w miejscu pobrania próbki potwierdza estymowana, według wzoru E.H. Kostera (1978), prędkość depozycyjna dla ziarna o wielkości odpowiadającej średniej średnicy, która wynosi  $48,7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Punkty tworzące zgrupowanie II – to próbki osadów piaszczystych. Ich położenie na diagramie zależności  $Mz-\sigma_1$ , (ryc. 9A) wskazuje, że wysortowanie materiału poprawia się wraz ze zmniejszaniem się wielkości średniej średnicy ziarna. Prędkości depozycyjne  $10\text{--}20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  oraz dodatnia skośność wskazująca na wzbogacenie osadu we frakcję drobniejszą w stosunku do występującej najczęściej świadczą o przynajmniej okresowo mniejszej erozyjności środowiska (ryc. 9B). Akumulacja osadów piaszczysto-mułkowych tworzących III populację próbek zachodziła przy mniejszej prędkości,  $6\text{--}10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Słabe wysortowanie tych osadów pogarsza się wraz ze zmniejszaniem się średniej średnicy ziarna, a skośno dodatni rozkład jest jeszcze bardziej przesunięty w kierunku ziaren o mniejszej średnicy (ryc. 9B). Takie parametry uziarnienia osadów wskazują, że ich akumulacja przerywana była okresowym i prawdopodobnie krótkotrwałym wzrostem energii wody. Próbki tworzące populację IV to osady mułkowe deponowane w warunkach prędkości nieprzekraczających  $3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ich słabe wysortowanie polepsza się wraz z zmniejszaniem się wielkości ziarna (ryc. 9A). Cechy te w połączeniu z niskimi wartościami skośności, zbliżonymi do wartości charakteryzujących rozkłady symetryczne, świadczą o stabilnych, niskoenergetycznych warunkach, jakie przeważały w czasie depozycji tych osadów (ryc. 9B).

Cechy opisanych wyżej zależności między wskaźnikami uziarnienia ukazują typową dla zbiorników zaporowych trójdzielność środowiska sedimentacyjnego. Próbkę składające się na populacje I i II reprezentują najbardziej dynamiczne odcinki zbiorników, położone w ich górnych częściach oraz bezpośrednio poniżej dopływów bocznych (ryc. 9). Osady denne zachowują tam w dużym stopniu właściwości charakterystyczne dla środowiska koryta rzecznego, a w przypadku zgrupowania I, ze względu na ich bardzo gruboziarnisty charakter, wykazują nawet cechy bruku korytowego. Populację III tworzą próbki osadów akumulowanych w zmiennych warunkach hydrodynamicznych. Frakcja piaszczysta deponowana była z obciążenia saltacyjnego, a drobniejsza mułkowa i ilasta odpowiednio z zawiesiny gradacyjnej i jednorodnej. Oznacza to, że deponowane



Ryc. 9. Zależności między wskaźnikami uziarnienia osadów dennych.  
A – Mz (średniej średnicy ziarna) i wysortowania ( $\sigma_p$ ); B – Mz i skośności rozkładu ( $Sk_p$ ).  
I-IV – populacje próbek opisane w tekście.

Relationships in grain-size distribution parameters of bottom sediments.  
A: Mean grain size (Mz) vs. standard deviation ( $\sigma_p$ ); B: Mz vs. skewness ( $Sk_p$ );  
I-IV - sample populations described in the text.

w okresach spokojnej sedimentacji osady podlegały okresowej resuspensji i krótkiemu transportowi typu saltacyjnego. Warunki takie charakterystyczne są dla środkowych rzeczno-jeziornych części zbiorników oraz rozszerzeń typu jeziornego o mniejszych głębokościach, gdzie dno podlega oddziaływaniu falowania i prądów wzbudzanych przez wiatr oraz przepływające statki. Duże rozprzestrzenienie tego typu warunków w UR może świadczyć o istotnym wpływie żeglugi na wykształcenie osadów dennych w tym zbiorniku. Populację IV stanowią próbki drobnoziarnistych osadów deponowanych z zawiesiny jednorodnej w głębokich profundalach rozciągających się głównie w dolnych odcinkach zbiorników.

Wpływ zmian prędkości przepływu wody na wielkość koncentracji zawiesiny ogólnej jest niejednoznaczny. Stwierdzono, że lokalny wzrost dynamiki wód



powoduje zwiększenie udziału zawiesiny mineralnej, a szczególnie frakcji piaszczystej, co jednak nie zawsze przekłada się na wzrost koncentracji zawiesiny ogólnej. Jest tak dlatego, że bioseston, który jest dominującą formą zawiesiny w badanych akwenach ma zdecydowanie lepsze warunki do rozwoju w miejscach o mniejszej dynamice wody, czyli tam gdzie koncentracja zawiesiny mineralnej jest mniejsza.

Jednym z najważniejszych czynników wpływających na zmiany właściwości chemicznych wód w zbiornikach zaporowych jest czas retencji wody. Tempo wymiany wody, oprócz sezonowej zmienności zasilania zbiorników wodami o różnej genezie, a więc i składzie chemicznym, jest główną przyczyną transformacji właściwości chemicznych wód w zbiornikach zaporowych (Straskraba, 1999). Wartości mineralizacji ogólnej oraz stężeń większości jonów zmniejszały się w kierunku zapory IR, gdzie zasolenie wody było mniejsze o około  $30 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  w porównaniu z górną, rzeczną częścią zbiornika (ryc. 4). Poniżej zapory IR zasolenie wody nie zmieniało się początkowo. Dopiero poniżej ujścia rzeki Dubna do UR widoczny był jego znaczący wzrost. Dalej, aż do zapory w Ugliczu mineralizacja wody zmniejszała się do poziomu podobnego jak powyżej i poniżej zapory IR. Niewielki wzrost zasolenia wody był widoczny ponownie w punktach poniżej zapory w Ugliczu (ryc. 4). Taki przebieg wskaźników zasolenia wody należy wiązać z obecnością w zbiornikach zaporowych tworzących kaskadę dwóch mas wodnych: wiosennej pochodzenia roztopowego i letniej kształtowanej przez wody podziemne. Specyfikę właściwości mas wodnych w zbiornikach zaporowych typu dolinnego oraz metody ich wyznaczania opisał szczegółowo K. Ėdelštejn (1991). W przypadku analizowanych zbiorników słabo zmineralizowane wody pochodzące z topnienia pokrywy śnieżnej, które zasilają Wołgę i jej dopływy wiosną, są obecne w pewnej ilości w dolnych odcinkach zbiorników jeszcze w sierpniu. Świadczą o tym obniżone wielkości koncentracji soli w dolnym, najgłębszym i najbardziej pojemnym odcinku IR oraz kolejnych zbiornikach kaskady (ryc. 4). Wiosenna masa wody jest jednak stopniowo wypierana ze zbiorników przez bardziej zmineralizowane wody podziemne, których udział w odpływie Wołgi i innych rzek uchodzących do zbiorników zwiększa się w czasie letnich niżówek. Do wzrostu zasolenia wód zbiornikowych przyczyniają się także zanieczyszczenia antropogeniczne wprowadzane do zbiorników przez dopływy rzeczne, na co zwrócili już uwagę E. Bikbulatov i inni (2001). Taką sytuację zaobserwowano m.in. poniżej ujścia Lamy do IR (pp. 5) oraz rzek Dubna i Miedwedica do UR (pp. 12 i 15) (ryc. 4). Poniżej ujść dopływów do UR obserwowany jest znaczący wzrost stężeń anionów siarczanowych, co podnosi również ich ogólną mineralizację. Podobne zmiany mineralizacji wody w tej części Kaskady Wołgi stwierdzono także w sezonie letnim 1997 (Bikbulatov i inni, 2001). Przetrwanie do miesięcy letnich pewnej części słabiej zmineralizowanych wód wezbrania wiosennego jest możliwe ze względu na długi czas wewnętrznej

wymiany wody, który w IR może wynosić dziewięć miesięcy, a w UR nawet dziesięć (Stefan, 1980).

Zróźnicowanie przebiegu stężeń substancji biogenicznych, ze względu na ich zaangażowanie w obieg biologiczny, w mniejszym stopniu nawiązuje do zmian warunków hydrologicznych. Bardziej wyrównany przebieg stężeń fosforanów niż azotanów oraz ich silniejszy, w porównaniu z azotanami, ujemny związek z zawartością zawiesiny organicznej (bioseston) sugeruje, że to fosfor jest pierwiastkiem limitującym wielkość produkcji pierwotnej w badanych zbiornikach. Przebieg stężeń azotanów odzwierciedla dostawę ze zlewni oraz źródeł antropogenicznych w większym stopniu niż fosforanów. Świadczą o tym wyższe wartości ich stężeń poniżej większych dopływów.

### Podsumowanie

Położenie zbiorników Kaskady Górnej Wołgi w obszarze o małym zróżnicowaniu cech środowiska przyrodniczego i podobnej pod względem skali i rodzaju antropopresji powoduje, że najważniejszymi czynnikami abiotycznymi, które wpływają na zmiany właściwości środowiska wodnego są hydrologia rzeki Wołgi i jej dopływów oraz procesy hydrodynamiczne zachodzące w samych zbiornikach. Procesy te powodują przekształcenie warunków termicznych i tlenowych, transformację właściwości chemicznych wód, a przede wszystkim zmiany właściwości litologicznych osadów dennych w zbiornikach kaskady górnej Wołgi. Przeprowadzone badania wykazały, że funkcjonowanie zbiorników w systemie kaskadowym nie wpływa na zanik, charakterystycznej dla zbiorników, trójdzielności środowiska wodnego wyrażonego obecnością strefy rzecznej, przejściowej i jeziornej. Odpowiednikami stref rzecznych w drugim i kolejnym zbiorniku są ich cofki, które rozciągają się do zapory wyższego zbiornika w kaskadzie. Duża energia i siła erozyjna wód poniżej zapór powoduje, że warunki hydrodynamiczne są tutaj podobne jak w górnych, rzecznych odcinkach zbiorników funkcjonujących samodzielnie. Opisywana trójdzielność zachowała się w przede wszystkim we właściwościach osadów dennych, w mniejszym stopniu jest zaś widoczna w przypadku cech fizyczno-chemicznych wody. Duża turbulencja wody poniżej zapór wpływa jednak na jej silne wymieszanie, czego skutkiem jest wyrównanie temperatury wody w pionie i lepsze natlenienie nadennnych warstw wody. W tym sensie upodabnia to ten odcinek zbiornika do rzecznych stref zbiorników funkcjonujących samodzielnie. Obecność słabo zmineralizowanych wód w dolnych najgłębszych odcinkach zbiorników i poniżej zapór świadczy o istnieniu ciągłości hydrochemicznej między kolejnymi zbiornikami. Istotny wpływ na zmiany przebiegu wielu analizowanych parametrów mają uwarunkowania lokalne. Tak jest między innymi w przypadku zawiesiny, gdzie lokalna dostawa w połączeniu z większą dynamiką środowiska wodnego wpływa na wzrost zawartości frakcji piaszczystej w zawieszynie. Dopływy boczne do zbiornika modyfikują przebieg

ogólnej mineralizacji wody, stężeń głównych jonów oraz azotanów. Skala wpływu i zasięgu oddziaływania dopływów bocznych na właściwości środowiska wodnego w zbiornikach zaporowych zależy od wielkości dopływu, odległości od zapory oraz właściwości fizycznych i chemicznych wód dopływów. Należy podkreślić, że oddziaływanie dopływów bocznych, ale również innych czynników lokalnych, takich jak zmiany głębokości zbiorników, obecność brzegów abrazyjnych czy intensywna żegluga, zakłóca przebieg kontinuum rzecznoego w równie dużym stopniu jak funkcjonowanie zapór (por. Poff i Zimmerman, 2010).

## Piśmiennictwo / References

- Abraham J., Allen P.M., Dworkin S.I., 1999, *Sediment type distribution in reservoirs: Sediment morphometry*, Environmental Geology, 38, 2, s. 101-110.
- Alexeevsky N.I., Chalov R.S., Berkovich K.M., Chalov S.R., 2013, *Channel changes in largest Russian rivers: Natural and anthropogenic effects*, International Journal of River Basin Management, 11, 2, s. 175-191.
- Babiński Z., 1992, *Współczesne procesy korytowe dolnej Wisły*, Prace Geograficzne, IGI PAN, 157.
- Bailey M.C., Hamilton D.P., 1997, *Wind induced sediment resuspension: A lake-wide model*, Ecological Modelling, 99, 2/3, s. 217-228.
- Banach M., 1985, *Osady denne – wskaźnik hydrodynamiki Zbiornika Włocławskiego*, Przegląd Geograficzny, 57, 4, s. 487-497.
- Barbosa F.A.R., Padisák J., Espíndola E.L.G., Borics G., Rocha O., 1999, *The cascading reservoir continuum concept (CRCC) and its application to the River Tietê-basin, São Paulo State, Brazil*, [w:] J.G. Tundisi, M. Straškraba (red.), *Theoretical Reservoir Ecology and its Application*, Backhuys Publishers, Leiden, s. 425-437.
- Bikbulatov E.S., Lebedev Yu.M., Litvinov A.S., Bikbulatova E.M., Roshchupko V.F., Ershov Yu V., Tsel'movich O.L., 2001, *Hydrochemical characteristics of the Upper Volga Reservoirs in the low-water season of 1997*, Water Resources, 28, 5, s. 553-561.
- Blott S. J., Pye K., 2001, *GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments*, Earth Surface Process and Landforms, 26, s. 1237-1248.
- Butorin N.V. (red.), 1978, *Ivankovskoe vodochranilišče i ego žizn*, Nauka, Leningrad.
- Callisto M., Goulart M., Barbosa F.A.R., Rocha O., 2005, *Biodiversity assessment of benthic macroinvertebrates along a reservoir cascade in the lower São Francisco river (north-eastern Brazil)*, Brazilian Journal of Biology, 65, 2, s. 229-240.
- Chick J.H., Pegg M.A., Koel T.M., 2006, *Spatial patterns of fish communities in the upper Mississippi River system: Assessing fragmentation by low-head dams*, River Research and Applications, 22, s. 413-427.
- Debolskij V.K., Grigorieva I.L., Komissarov A.B., 2014, *Sovremennaja gidrochimičeskaja charakteristika vodochranilišč Volžskogo kaskada v period letnej mežen*, [w:] D.B. Gelašvili G.V., Šurganova (red.), *Ekologičeskij monitoring. VIII Sovremennyye problemy monitoringa presnovodnyh ekosistem*, Izd. Nižegorodskogo Gosuniversiteta, Nižnij Novgorod, s. 61-76.
- Dubnyak S., Timchenko V., 2000, *Ecological role of hydrodynamic processes in the Dnieper reservoirs*, Ecological Engineering, 16, 1, s. 181-188.

- Ėdelštejn K.K., 1991, *Vodnyje massy dolinnych vodochranilišč*, Izd-vo MGU, Moskva.
- Ėdelštejn K.K., 1998, *Vodochranilišča Rossii: Ekologičeskie problemy i puti ich rešenija*, GEOS, Moskva.
- Folk R.L., Ward W.C., 1957, *Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters*, Journal of Sedimentary Petrology, 27, s. 3-26.
- Frémion F., Bordas F., Mourier B., Lenain J.F., Kestens T., Courtin-Nomade A., 2016, *Influence of dams on sediment continuity: A study case of a natural metallic contamination*, Science of The Total Environment, 547, s. 282-294.
- Georgievskij V.Ů., (red.), 2015, *Naučno-prikladnoj spravočnik: Osnovnye gidrologičeskie charakteristiki rek bassejna Verchnej Volgi*, (Ėlektronnyj resurs), Ministerstvo Prirodných Resursov i Ėkologii Rossijskoj Federacii, Federal'naja SluŹba po Gidrometeorologii i Monitoringu Okružajuščej Sredy, Federalnoje gosudarstvennoje būdžetnoje učreŹdenie Gosudarstvennyj Gidrologičeskij Institut, Izdatelstvo Muhametov G.V., Livny.
- Gierszewski P., 2004, *Zmiany chemizmu wód w profilu podłużnym dolnej Wisty – wpływ zabudowy hydrotechnicznej, prognoza zmian*, [w:] M. Błaszkiwicz, P. Gierszewski (red.), *Rekonstrukcja i prognoza zmian środowiska przyrodniczego w badaniach geograficznych*, Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 200, s. 69-99.
- Gierszewski P., 2011, *Impact of the Włocławek Reservoir on the conditions for the transport of suspended load*, Geomorphologia Slovaca et Bohemica, 11, 1, s. 28-41.
- Gierszewski P., Szymańda J.B., Luc M. 2006, *Distribution of the bottom deposits and accumulation dynamics in the Włocławek Reservoir (central Poland)*, WSEAS Transactions on Environment and Development, 5, 2, s. 543-549.
- Gierszewski P.J., Szymańda J.B., Luc M., 2015, *Zmiany układu koryt Wisty spowodowane funkcjonowaniem stopnia wodnego „Włocławek” na podstawie analizy zdjęć lotniczych*, Przegląd Geograficzny, 87, 3, s. 517-533.
- Grigorieva I.L., 2012, *Mnogoletnije tendencii izmenenija kačestva vody verchnevolŹskich vodochranilišč*, [w:] A.V. Krylov (red.), *Bassejn Volgi v XX-m veke: Struktura i funkcionirovanie ekosistem vodochranilišč*, IBVV RAN, Borok, s. 48-51.
- Habel M., 2013, *Dynamics of Vistula River channel deformation downstream of the Włocławek Reservoir*, Wydawnictwo Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz.
- Kawara O., Yura E., Fujii S., Matsumoto T., 1998, *A study on the role of hydraulic retention time in eutrophication of the Asahi river dam reservoir*, Water Science and Technology, 37, 2, s. 245-252.
- Kim B.R., Higgins J.M., Bruggink D.J., 1983, *Reservoir circulation patterns and water quality*, Journal of Environmental Engineering, 109, s. 1284-1294.
- Kimmel B.L., Groeger A.W., 1984, *Factors controlling primary production in lakes and reservoirs: A perspective*, Lake and Reservoir Management, 1, 1, s. 277-281.
- Kopylov A.I. (red.), 2001, *Ekologičeskie problemy Verchnej Volgi: Kollektivnaja monografija*, Izd. ĖGTU, Jaroslavl.
- Koster E.H., 1978, *Transverse rib: Their characteristics, origin and paleohydrologic significance* [w:] A.D. Miall (red.), *Fluvial Sedimentology*, Canadian Society of Petrology Geologists Mem., 5, s. 161-186.
- Lindim C., Pinho J.L., Vieira J.M.P., 2011, *Analysis of spatial and temporal patterns in a large reservoir using water quality and hydrodynamic modeling*, Ecological Modelling, 222, s. 2485-2494.
- Litvinov A.S., Mineeva N.M., Papchenkov V.G., Korneva L.G., Lazareva V.I., Shcherbina G.Kh., Gerasimov Yu.V., Dvinskikh S.A., Noskov V.M., Kitaev A.B., Alexevnina M.S., Presnova E.V., Seletkova E.B., Zinov'ev E.A., Baklanov M.A., Okhapkin A.G., Shur-

- ganova G.V., 2009, *Volga River Basin*, [w:] K. Tockner, U. Uehlinger, C.T. Robinson (red.), *Rivers of Europe*, Elsevier, Academic Press, s. 23-57.
- Magilligan F.J., Nislov K.H., 2005, *Changes in hydrologic regime by dams*, *Geomorphology*, 71, s. 61-78.
- McCartney M.P., Sullivan C., Acreman M.C., 2001, *Ecosystem Impacts of Large Dams*, Background Paper, 2, Prepared for IUCN/UNEP/WCD IUCN and UNEP, Switzerland.
- McLaren P., 1981, *An interpretation of trends in grain size measures*, *Journal of Sedimentary Petrology*, 51, s. 611-624.
- Miranda L.E., Habrat M.D., Miyazono S., 2008, *Longitudinal gradients along a reservoir cascade*, *Transactions of the American Fisheries Society*, 137, s. 1851-1865.
- Morris G.L., Fan J., 1998, *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watershed for Sustainable Use*, McGraw-Hill, New York.
- Mycielska-Dowgiałło E., Ludwikowska-Kędzia M., 2011, *Alternative interpretations of grain-size data from Quaternary deposits*, *Geologos*, 17, 4, s. 189-203.
- Palmer R.W., O'Keeffe J.H., 1990, *Downstream effects of impoundments on the water chemistry of the Buffalo River (Eastern Cape), South Africa*, *Hydrobiologia*, 202, 1, s. 71-83.
- Poff N.L., Zimmerman J.K.H., 2010, *Ecological response to altered flow regimes: A literature review to inform science and management of environmental flows*, *Freshwater Biology*, 55, s. 194-205.
- Schumm S.A., 1977, *The Fluvial System*, John Wiley & Sons, New York.
- Štefan V.N., 1980, *Vodoobmen vodochranilišč volžsko-kamskogo kaskada*, Kompleksnyje issledovanija vodochranilišč, Vyp. V, Izd. MGU, Moskva, s. 46-55.
- Silva C.A., Train S., Rodrigues L.C., 2005, *Phytoplankton assemblages in a Brazilian subtropical cascading reservoir system*, *Hydrobiologia*, 537, s. 99-109.
- Smith W.S., Espíndola E.L.G., Rocha O., 2014, *Environmental gradient in reservoirs of the medium and low Tietê River: Limnological differences through the habitat sequence*, *Acta Limnologica Brasiliensia*, 26, 1, s. 73-88.
- Straškraba M., 1990, *Limnological particularities of multiple reservoir series*, *Archiv für Hydrobiologie Beiheft Ergebnisse der Limnologie*, 33, s. 677-678.
- Straškraba M., 1994, *Vlatava cascade as teaching grounds for reservoir limnology*, *Water Science and Technology*, 30, s. 289-297.
- Straškraba M., 1999, *Retention time as a key variable of reservoir limnology*, [w:] M. Straškraba, J.G. Tundisi (red.), *Theoretical Reservoir Ecology and its Applications*, International Institute of Ecology, Kraków, s. 385-410.
- Ward J.V., Stanford J.A., 1995, *The serial discontinuity concept: Extending the model to floodplain rivers*, *Regulated Rivers – Research and Management*, 10, s. 159-168.
- Waterloo Hydrogeologic, AQUACHEM®, Kitchener, ON, Canada.
- Vannote R.L., Minshall G.W., Cummins K.W., Sedell J.R., Cushing C.E., 1980, *The river continuum concept*, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, s. 130-137.
- Velichko A.A., Faustova M.A., Gribchenko Yu.N., Pisareva V.V., Sudakova N.G., 2004, *Glaciations of the East European Plain – distribution and chronology*, [w:] J. Ehlers, P.L. Gibbard (red.), *Quaternary Glaciations Extent and Chronology Part I: Europe*, *Developments in Quaternary Sciences*, 2, 1, s. 337-354.
- Zakonnov V.V., 1995, *Space and time heterogeneity in the distribution and accumulation of bottom sediments in the Upper Volga Reservoirs*, *Vodnyje Resursy*, 22, 3, s. 362-371.
- Zakonnov V.V., Poddubnyj S.A., 2002, *Structural variations of bottom sediments in the Rybinsk Reservoir*, *Water Resources*, 29, 2, s. 181-190.



PIOTR J. GIERSEWSKI, VIKTOR V. ZAKONNOV, MICHAŁ KASZUBSKI,  
JAROSŁAW KORDOWSKI

## TRANSFORMATION OF WATER AND SEDIMENT PROPERTIES ALONG THE LONGITUDINAL PROFILE OF THE UPPER VOLGA CASCADE RESERVOIRS

The operation of dams is the key cause of river discontinuity, with reduced flow velocity towards dams reflected in gradual change in the physicochemical properties of water, the concentration and characteristics of suspension matter, and the properties of bottom sediments. In the case of dam reservoirs operating in a cascade system, the most major transformations of river-water abiotic and biotic characteristics take place in the first reservoir of the cascade, with properties of the aqueous environment in consecutive bodies of water then affected markedly.

Detailed here, research conducted in the Upper Volga Reservoirs in Russia sought to assess the size and nature of changes in the physicochemical properties of water and in characteristics of the suspended material and bottom sediments that take place along the longitudinal profile of this Cascade of reservoirs. Results were then used to determine the relationships pertaining between the separate reservoirs of the Cascade, and to recognise the capacity for the typical longitudinal zonation to be reproduced in consecutive reservoirs along the cascade.

The reservoirs of the upper part of the Volga Cascade are located in an area of limited environmental contrast. In such a situation, variability to the physicochemical properties of water and characteristics of the bottom sediments along the longitudinal profile are conditioned primarily by hydrological factors.

The study showed that the functioning of the reservoirs as part of a cascade system did not result in the disappearance of the characteristic three-section aquatic environment, expressed by the presence of riverine, transitional and lacustrine zones. The equivalent of the riverine zones in the second and subsequent reservoirs are backflow zones, which extend to the dam of the upstream reservoir. The high-energy, erosive force of water downstream from dams denotes hydrodynamic conditions similar to those in the upper, riverine sections of reservoirs operating independently.

The presented three-section model for the reservoirs was preserved mainly in terms of diversified bottom-sediment properties. A regularity detected entailed decreasing mean grain size towards the dam, and a parallel increase in OM content in the sediment. A significant impact on bottom-sediment properties is also exerted by the velocity and direction of currents, by depth and bottom morphology, and by the properties of the clastic material supplied to the reservoir from various sources. Only to a lesser extent is the three-section model of the aquatic environment in reservoirs evident in physicochemical properties of the water. However, the intense turbulence present in water below dams ensures such strong mixing that vertical gradients in water temperature are realigned, and oxygenation of bottom layers of water improved. In this sense, these particular sections of reservoirs are similar to the riverine zones of reservoirs operating independently. The presence of less-mineralised water in the lower, deepest sections of the reservoirs and below dams indicates a hydrochemical connection between the consecutive bodies of water. Furthermore, a significant influence on changes in the

course of analysed parameters must be ascribed to local conditions, with the impacts of tributaries, but also other local factors like depth, the presence of erosional banks and intensity of shipping, proving just as important as causes of disturbance to the river continuum as dams.

