

Wpływ zbiornika retencyjnego na fizykochemiczne właściwości rzeki himalajskiej (Tista, Indie)

Impact of a dam reservoir on the chemistry of a Himalayan river (the Teesta, India)

ŁUKASZ WIEJACZKA, PAWEŁ PROKOP

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego,
Polska Akademia Nauk; wieja@zg.pan.krakow.pl pawel@zg.pan.krakow.pl

RAFAŁ KOZŁOWSKI

Katedra Ochrony i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach
25-406 Kielce, ul. Świętokrzyska 15; rafalka@ujk.edu.pl

SUBIR SARKAR

North Bengal University, Geography Department
734430 Siliguri, India; subirsnbu@yahoo.co.in

Zarys treści. W artykule przedstawiono rolę nowo wybudowanego zbiornika retencyjnego w kształtowaniu właściwości fizykochemicznych i składu chemicznego rzeki Tisty (dopływ Brahmaputry) w Himalajach. Badania terenowe przeprowadzono w okresie pomonsunowym w latach 2013-2015. Analiza składu chemicznego wody w profilu podłużnym rzeki powyżej i poniżej zbiornika wykazała, że w zbiorniku następuje obniżenie stężenia większości podstawowych jonów (Cl^- , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , NO_3^- i PO_4^{3-}), odwrotny trend zaobserwowano tylko w przypadku jonów Ca^{2+} , SO_4^{2-} i NH_4^+ . Istnienie zapory nie wpływa na stężenie jonów F^- . Poniżej zbiornika odnotowano nieznaczne wzbogacenie wód w jony metali: Cu, Ni, Zn, Cr, C i Sr. Mniejsze stężenie jonów w rzece poniżej zapory wskazuje na procesy samooczyszczania wody retencjonowanej w zbiorniku. Zmiany właściwości fizykochemicznych oraz stężeń jonów następujące w zbiorniku są niwelowane przez czynniki środowiskowe jeszcze na obszarze Himalajów na odcinku do 15 km poniżej zapory.

Słowa kluczowe: chemizm wody, jakość wody, zbiornik zaporowy, rzeka Tista, Himalaje.

Wprowadzenie

Skład chemiczny i parametry fizykochemiczne wody w rzekach świadczą o jakości wody i pozwalają określić jej przydatność do zastosowań komunalnych, rolniczych i przemysłowych (m.in. Chapman, 1996; Nikanorov i Brazhnikov, 2009; Sharma i Subramanian, 2008). Właściwości fizykochemiczne wody są jed-

nym z głównych czynników wpływających na prawidłowe funkcjonowanie ekosystemów rzecznych (Allan i Castillo, 2007). Skład chemiczny wody jest efektem naturalnych procesów rozpuszczania związków pochodzących z różnych źródeł, w tym m.in. gazów i aerozoli z atmosfery, wietrzenia i erozji, a także czynników antropogenicznych (Hem, 1985). Sezonowe zmiany w składzie chemicznym wód rzecznych są związane przede wszystkim ze zmianami przepływu wody (Livingstone, 1963), a dokładnie ze zmianą proporcji poszczególnych dróg dostawy wód do koryta w trakcie wezbrań, przy czym każda z dróg dostawy zwykle odznacza się innym składem.

Ważną rolę w kształtowaniu składu chemicznego i parametrów fizykochemicznych systemów rzecznych odgrywają również zbiorniki zaporowe (np. Fairchild i Velinsky, 2006; Gao i inni, 2013; Soja i Wiejaczka, 2014). Skład chemiczny wody dopływającej do zbiornika zwykle ulega znaczącej zmianie podczas piętrzenia, a zmiany można zaobserwować również poniżej zbiornika. Właściwości fizykochemiczne wody odpływającej ze zbiornika zależą od jakości wody wpływającej do niego, biotycznych i abiotycznych procesów zachodzących w zbiorniku, jego parametrów oraz głębokości, z której zachodzi odpływ wody (Hannan, 1979). Piętrzenie wody na rzekach ma szczególnie wpływ na skład chemiczny wody w przypadku zbiorników z dłuższym czasem jej magazynowania (Gao i inni, 2013; Fairchild i Velinsky, 2006). Małe zbiorniki powodują zazwyczaj niewielkie zmiany chemizmu wód, które są niwelowane w odległości do 3 km poniżej zapory. Zasięg modyfikacji składu chemicznego wód przez duże zbiorniki sięga do 30 km (Palmer i O’Keeffe, 1990). Równocześnie zmiany chemiczne wody spowodowane przez zbiorniki z górnym przelewem są mniejsze od zmian spowodowanych przez zbiorniki z odpływem dolnym.

Stosunkowo powolny przepływ wody w zbiornikach w porównaniu z rzekami umożliwia sedimentację zawieszono materiału oraz inicjuje procesy zmniejszające zawartość azotu i fosforu. Obecność zbiorników retencyjnych na rzekach często więc sprzyja poprawie jakości wody (np. Harrison i inni, 2009; Rigacci i inni, 2013).

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na energię rząd Indii zdecydował się podwoić jej produkcję z wykorzystaniem potencjału rzek, budując liczne elektrownie wodne. Jednym z obszarów, w których takie inwestycje są realizowane jest dorzecze Tisty – prawego dopływu Brahmaputry (Grumbine i Pandit, 2013). Budowa wielu zbiorników w obrębie jednej zlewni może prowadzić do znacznych przekształceń środowiska przyrodniczego, w tym zmian hydrochemicznych, które wpływają na jakość wody. W kwietniu 2013 r. została zakończona budowa jednej z planowanych zapór – Teesta Low Dam-III, położonej w stanie Bengal Zachodni. Zapora zbiornika ma 32,5 m wysokości, a moc funkcjonującej przy niej elektrowni wynosi 132 MW. Podstawowym zadaniem zbiornika jest wykorzystanie potencjału energetycznego wód Tisty.

Celem badań było określenie wpływu nowo powstałego zbiornika retencyjnego na parametry fizykochemiczne i skład chemiczny wody w himalajskim biegu Tisty. Ponadto przedstawiono skalę, kierunek i zasięg oddziaływania zbiornika na stężenia podstawowych jonów oraz jonów metali w wodzie analizowanej rzeki.

Obszar badań

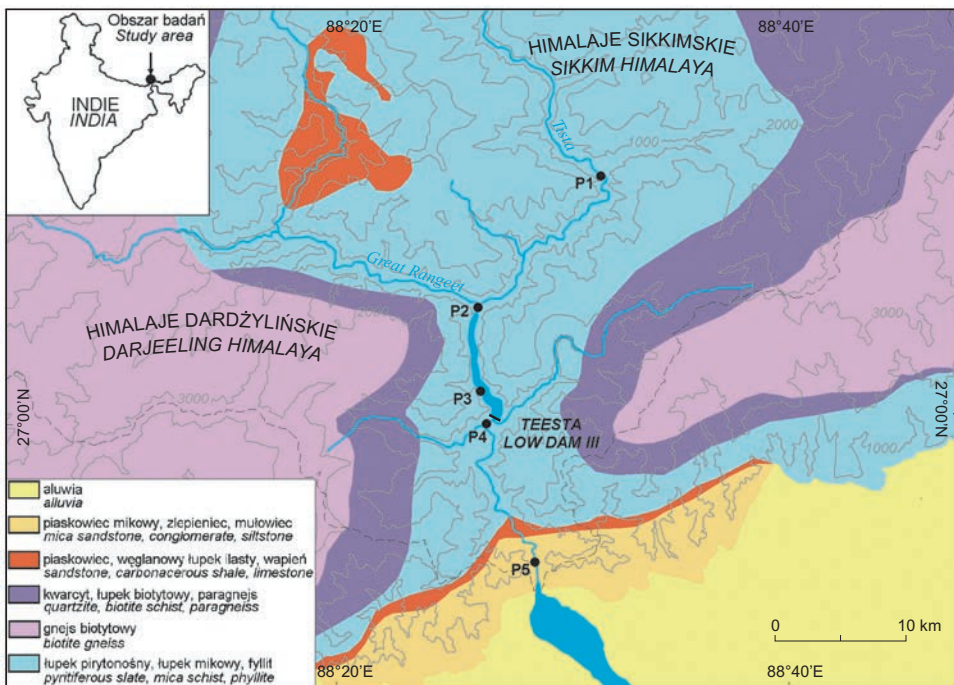
Tista jest prawobrzeżnym dopływem Brahmaputry o całkowitej długości 414 km (powierzchnia zlewni wynosi 12 159 km²), z czego górny odcinek o długości 200 km (8051 km²) jest położony w obrębie Himalajów Sikkimskich i Dardżylińskich. Tista wypływa z jeziora lodowcowego na wysokości 5280 m n.p.m. Wschodnie dopływy rzeki w obrębie gór są krótsze, ale liczniejsze w porównaniu do zachodnich. Ponadto dopływy prawobrzeżne odwadniają zlodowacone obszary z dużymi polami śnieżnymi, natomiast lewobrzeżne biorą początek z mniejszych, niestałych pól śnieżnych (CISMHE, 2006). Na badanym obszarze głównym dopływem jest Great Rangeet (tu: Rangit), uchodzący do Tisty w miejscowości Teesta Bazar. Poniżej wymienionego dopływu Tista zmienia swój bieg z południowo-zachodniego na południowo-wschodni. Reżim hydrologiczny Tisty jest złożony. Rzeka jest zasilana wodami z topniejącego śniegu i lodu, wód podziemnych i bardzo wysokich opadów, których roczna suma osiąga 4000-6000 mm w brzeżnej części Himalajów i zmniejsza się do 3000 mm w Sikkimie (Starkel i Basu, 2000; Bookhagen i Burbank, 2010). Średni roczny przepływ Tisty około 45 km poniżej brzegu Himalajów wynosi około 600 m³·s⁻¹. Przeciętne miesięczne przepływy w czasie letniego monsunu osiągają 1500 m³·s⁻¹ i maleją do 120 m³·s⁻¹ w porze suchej (Vörösmarty i inni, 2004). Maksymalny przepływ w czasie największej powodzi w 1968 r. oszacowano na 18 000 m³·s⁻¹ (Murray i Bochin, 1973).

Zlewnia Tisty znajduje się we wschodniej części Himalajów (ryc. 1). Północną część zlewni budują gnejsy i granity. W środkowym obszarze wzrasta udział kwarcytów, łupków i fyllitów. W południowej części, będącej równocześnie brzegiem Himalajów, dominują piaskowce i zlepieńce (Acharyya, 1980; Bhattacharyya i Mitra, 2012).

Górską część zlewni Tisty porasta w większości las naturalny. Do wysokości 1000 m n.p.m. występuje las liściasty wilgotny, a od 2000 m n.p.m. wiecznie zielony lasy tropikalny. Piętro rododendronów między 2500 a 2800 m n.p.m. przechodzi w lasy iglaste na wysokości 3000-3500 m n.p.m. Górna część zlewni jest porośnięta subalpejskim lasem jodłowym, który stopniowo zmienia się w alpejskie łąki powyżej górnej granicy lasu na wysokości 4000 m n.p.m. (Champion i Seth, 1968). Obszar wiecznego śniegu rozciąga się powyżej 5300 m n.p.m. W Himalajach Dardżylińskich zlewnia Tisty jest gęściej zaludniona i skutki oddziaływania antropogenicznego (uprawa ryżu i herbaty) są bardziej widoczne niż w górnej części, w obrębie Himalajów Sikkimskich (Prokop i Płoskonka, 2014).

Metody badań

Prace terenowe polegające na pomiarach parametrów fizykochemicznych wody oraz poborze prób wody do analizy składu chemicznego przeprowadzono trzykrotnie (3 próby wody z każdego punktu pomiarowego) w porze pomarszowej (na przełomie listopada i grudnia) w latach 2013-2015. Pomiarzy zostały wykonane między 12:00 a 15:00 (czasu lokalnego), przy maksymalnych wartościach temperatury powietrza w ciągu dnia. Punkty pomiarowe rozlokowano na odcinku Tisty o długości 43 km w obrębie Himalajów Dardżylińskich między granicą Sikkimu i Bengalu Zachodniego, a południowym brzegiem Himalajów (ryc. 1). Powyżej nowo powstałego zbiornika pomiary wykonywano w dwóch punktach (P1 i P2 – poniżej ujścia Great Rangitu). W zbiorniku (P3), pomiary przeprowadzono w środkowej jego części (przy brzegu). Dwa punkty (P4 i P5) znajdowały się na rzece poniżej zapory.



Ryc. 1. Obszar badań i położenie punktów pomiarowych oraz poboru próbek wody. Linią przerywaną zaznaczono granice zlewni. Wysokości w m n.p.m.

Opracowanie własne, podobnie pozostałe ryciny oraz tabele.

Study area and location of water measurement and sampling points. The dotted line denotes the limits of the catchment. Altitudes are in m a.s.l.

Authors' own elaboration, as with the remaining figures and tables.

Temperaturę wody, pH oraz przewodność mierzono w terenie za pomocą pH-metru i konduktometru. Laboratoryjną analizę zawartości głównych jonów w pobranych próbkach wody przeprowadzono w Laboratorium Badań Środowiska Katedry Ochrony i Kształtowania Środowiska UJK w Kielcach przy użyciu systemu chromatografii jonowej (ICS 3000 Dionex). Stężenia metali w próbkach oznaczano z zastosowaniem spektrometru ICP-MS-TOF GBC. Próbki wody były testowane na obecność następujących kationów: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ oraz anionów Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , F^- , PO_4^{3-} , jak również jonów metali: Fe, Al, Sr, Ni, Zn, Cu, Cr, Co, Mn, Cd i Pb.

Wskaźnik zdolności neutralizacji kwasów ANC (*acid neutralising capacity*) obliczono stosując wzór ($\text{K}^+ + \text{Na}^+ + 2\text{Mg}^{2+} + 2\text{Ca}^{2+} - \text{NO}_3^- - \text{Cl}^- - 2\text{SO}_4^{2-}$). Wskaźnik ANC dostarcza informacji na temat stopnia wrażliwości wód powierzchniowych na zakwaszenie (Reuss i Johnson, 2012; Bi i inni, 2001). ANC jest powszechnie uważany za lepszy wskaźnik stanu równowagi kwasowo-zasadowej w wodach naturalnych, w porównaniu do pH, ponieważ nie zmienia się np. wraz z dobowymi wahaniami zawartości węgla nieorganicznego w wodzie (Hemond, 1990). Do określenia wpływu zbiornika na stężenie jonów metali w wodzie Tistry zastosowano współczynnik wzbogacenia *EF* (*enrichment factor*). Współczynnik *EF* służy do oceny oddziaływania antropogenicznego, a obliczany jest za pomocą równania (Abraham i Parker, 2008):

$$EF = (C_x/C_b)_{\text{próbka}} / (C_b/C_x)_{\text{próbka odniesienia}}$$

Równanie jest stosunkiem stężenia badanego elementu (C_x) do elementu odniesienia (C_b) odpowiednio w badanej próbce i w próbce odniesienia. W niniejszej analizie wykorzystano jony żelaza jako element odniesienia, ponieważ pochodzą one głównie z naturalnych źródeł (litologii), a ich stężenie nie jest związane ze stężeniem innych jonów metali. Stężenie jonów żelaza jako element odniesienia jest powszechnie wykorzystywane w obliczeniach współczynnika wzbogacenia *EF* (Abraham i Parker, 2008; Zhao i inni, 2012).

Wartości podstawowych parametrów i wskaźników fizykochemicznych, jak i stężenia poszczególnych jonów przedstawionych w pracy są średnią arytmetyczną z wartości dla okresu 2013-2015.

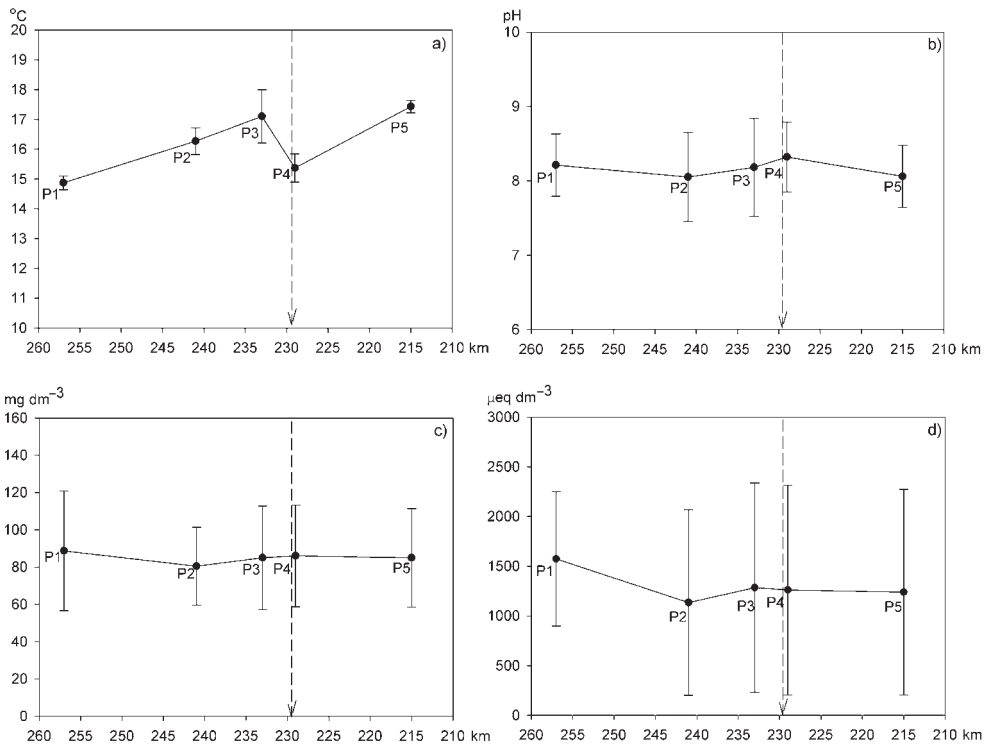
Wyniki i dyskusja

Zmiany parametrów fizykochemicznych w profilu podłużnym Tistry

Temperatura wody w Tiście powyżej zbiornika wykazuje naturalny wzrost wraz z biegiem rzeki. W górnej części odcinka badawczego temperatura wody wynosiła $14,9^\circ\text{C}$ i była wyższa o $1,4^\circ\text{C}$ niż 17 km poniżej, na granicy rzeki i cofki zbiornika (ryc. 2, tab. 1). Wpływ nowo wybudowanego zbiornika na temperaturę wody jest zauważalny, ale zakres zmian spowodowanych jego funkcjonowaniem nie jest znaczący. Poniżej zapory, temperatura Tistry była tylko $0,9^\circ\text{C}$ niższa

w stosunku do rzeki powyżej zbiornika ($16,3^{\circ}\text{C}$) oraz o $1,9^{\circ}\text{C}$ w stosunku do wody w zbiorniku. Mały zakres zmian temperatury wskazuje na wykształcenie się słabej stratyfikacji termicznej w zbiorniku ze względu na zachodzącą w nim szybką wymianę wody. Woda w Tiście w miejscu wypływu z Himalajów miała $17,4^{\circ}\text{C}$, zatem na odcinku rzeki o długości około 15 km termiczne różnice spowodowane obecnością zbiornika zostały zniwelowane.

Woda w Tiście ma odczyn zasadowy. Wartości pH wody wahały się w zakresie 8,1-8,3 i wykazywały niewielki spadek alkaliczności na odcinku rzeki powyżej i poniżej zbiornika. W zbiorniku i w wodzie wypływającej z niego wartości pH były nieco wyższe (ryc. 2, tab. 1).



Ryc. 2. Średnie wartości temperatury wody ($^{\circ}\text{C}$), pH, sumy substancji rozpuszczonych (TDS) ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) oraz wskaźnika zakwaszenia ANC ($\mu\text{eq}\cdot\text{dm}^{-3}$) wraz z odchyleniem standardowym w profilu podłużnym Tisty w Himalajach Dardżylińskich w porze pomonsunowej w latach 2013-2015 (strzałka wskazuje położenie zapory)

Mean values with standard deviations, for water temperature ($^{\circ}\text{C}$), pH, TDS ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) and ANC ($\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$) in the longitudinal profile of the Teesta between Sikkim and the margin of the Himalayas in the post-monsoon season of the period 2013-2015 (the arrow indicates the position of the dam)

Tabela 1. Skład chemiczny wody Tisty w profilu podłużnym Tisty w Himalajach Dardżylińskich w porze pomonsonowej w latach 2013-2015 (stężenie jonów oraz suma substancji rozpuszczonych (TDS) w $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$)

The physico-chemical composition of water in the River Teesta between Sikkim and the margin of the Himalaya in the post-monsoon period (2013-2015) (ions and TDS in $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$)

Parametry Parameters	P1		P2		P3		P4		P5	
	średnia mean	odch.st. Std dev.	średnia mean	odch.st. Std dev.	średnia mean	odch.st. Std dev.	średnia mean	odch.st. Std dev.	średnia mean	odch.st. Std dev.
T (°C)	14,9	0,2	16,3	0,5	17,1	0,90	15,4	0,5	17,4	0,2
pH	8,21	0,42	8,05	0,60	8,18	0,66	8,32	0,47	8,06	0,4
Ca ²⁺	14,6	6,5	12,0	4,0	13,4	4,7	13,9	5,8	13,5	5,3
Mg ²⁺	1,3	0,3	1,6	0,3	1,6	0,6	1,4	0,3	1,5	0,3
Na ⁺	5,4	3,5	5,8	3,5	5,8	4,3	5,1	3,4	5,7	3,1
K ⁺	1,4	0,4	1,4	0,2	1,2	0,3	1,6	0,3	1,5	0,2
Cl ⁻	1,6	1,2	1,6	0,5	1,2	0,5	1,0	0,3	1,7	1,2
SO ₄ ²⁻	7,6	0,3	6,4	0,6	6,6	0,5	7,0	0,5	6,9	0,3
F ⁻	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,03
NO ₃ ⁻	1,2	0,2	1,0	0,4	0,7	0,3	0,8	0,2	0,7	0,2
HCO ₃ ⁻	54,8	23,2	50,0	15,4	53,8	20,9	54,6	20,2	53,0	19,4
PO ₄ ³⁻	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,0	0,00	0,0	0,01	0,02
NH ₄ ⁺	0,12	0,20	0,13	0,20	0,16	0,26	0,18	0,27	0,1	0,2
TDS	88,7	32,0	80,4	20,9	85,0	27,9	86,0	27,2	85,0	26,5
ANC ($\mu\text{eq}\cdot\text{dm}^{-3}$)	1573	676	1133	932	1284	1052	1260	1054	1238	1035

Wartości ANC w odcinku badawczym Tisty wynosiły średnio od 1429-1561 $\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ (ryc. 2, tab. 1). ANC>0 wskazuje, że wody powierzchniowe mają bezpośredni kontakt z fazą stałą gleby nasyconą kationami zasadowymi i dlatego zawartość jonów Al i Fe jest niska. Dowodzi to, że wody te nie wykazują zagrożenia zakwaszeniem niezależnie od zagospodarowania zlewni.

Suma substancji rozpuszczonych w wodzie (*total dissolved solids TDS*) wykazuje spadek z 88,66 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w górnej części odcinka badawczego do 80,44 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ poniżej ujścia Rangitu. Niewielki wzrost mineralizacji do 84,97-85,95 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ występuje w samym zbiorniku i utrzymuje się również w wodzie wypływającej z niego. Podobna suma substancji rozpuszczonych w wodzie utrzymuje się do wylotu Tisty z Himalajów (ryc. 2, tab. 1).

Zmiany składu chemicznego wody w profilu podłużnym Tisty

Główne aniony, które występują w pobranych próbach wody, pod względem wielkości stężeń wyrażonych w $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ układają się w kolejności: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{F}^- > \text{PO}_4^{3-}$. Średnie stężenia wodorowęglanów i siarczanów stanowią odpowiednio 81% i 13% całkowitego stężenia anionów. Udział chlorków wynosi około 4%, a azotanów, fosforanów i fluorków stanowi razem zaledwie około 2% całkowitego stężenia anionów. Analiza stężenia anionów w profilu podłużnym Tisty (ryc. 1, tab. 1) wykazała, że nowo wybudowany zbiornik przyczynia się do zmniejszenia stężenia (wartości średnie) jonów Cl^- , NO_3^- i PO_4^{3-} , zwiększenia stężenia jonów HCO_3^- i SO_4^{2-} , natomiast nie wpływa na stężenie F^- .

Na odcinku rzeki powyżej zbiornika obserwowano spadek stężenia HCO_3^- z 54,8 do 50,0 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. W wodzie wypływającej ze zbiornika odnotowano wzrost stężenia tych jonów do 54,6 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, a następnie niewielki spadek do 53,0 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ na końcu profilu pomiarowego, gdzie rzeka wypływa z Himalajów. Wysokie stężenie HCO_3^- świadczy o płytkim charakterze zasilania rzeki i dominacji zasilania płytkimi wodami infiltracyjnymi oraz wodami ze spływów.

Powyżej zbiornika stwierdzono zmniejszenie stężenia SO_4^{2-} z 7,6 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ do 6,4 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ poniżej ujścia Great Rangitu. W wodzie wypływającej ze zbiornika stężenie tych jonów zwiększyło się do 7,1 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, a podobne wartości koncentracji SO_4^{2-} odnotowano także na końcu odcinka badawczego. Niskie stężenie jonów SO_4^{2-} w całym badanym odcinku rzeki Tisty i ich wysoka korelacja z jonami Ca, wskazuje na naturalne źródło ich pochodzenia, głównie z wietrzenia łupków pirytonośnych (Mahanta i Subramanian, 2004). Źródłem niewielkiej dostawy SO_4^{2-} mogą być również ścieki dostarczane wraz z wodami dopływów Tisty odwadniających gęściej zaludnione małe zlewnie wokół zbiornika.

Zawartość jonów Cl^- w rzece powyżej zbiornika wynosiła 1,6-1,7 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. W zbiorniku oraz w wodzie wypływającej z niego ich stężenie zmalało do 1,1-1,2 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Przy wylocie rzeki z Himalajów poziom Cl^- był już zbliżony do obserwowanego powyżej zbiornika. Bardzo niskie stężenie Cl^- w wodzie Tisty wskazuje na jego naturalne pochodzenie z depozycji wraz z opadem aerozoli morskich oraz wietrzenia skał magmowych i niektórych skał osadowych. Jony chlorkowe zwykle nie wchodzi w reakcje utleniania i redukcji, zatem zmniejszenie ich stężenia w zbiorniku jest w dużej mierze efektem procesów fizycznych.

Stężenia F^- były niskie i wahały się pomiędzy 0,2 i 0,3 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ wzdłuż całego badanego profilu podłużnego Tisty. W zlewni Tisty nie ma zakładów przerobu metali ani przemysłu chemicznego, które mogłyby być ewentualnym źródłem dostawy F^- do wód powierzchniowych. Obecność fluorków w wodach Tisty jest więc wynikiem ich wymycia z gleby przez spływ powierzchniowy z pobliskich terenów rolniczych.

Stężenie NO_3^- w zbiorniku i w wodzie wypływającej z niego ($0,7-0,8 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) było niższe w porównaniu do odcinka badawczego powyżej zbiornika ($1,0-1,2 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$). W Tiście odnotowano typowe dla wód naturalnych niskie stężenia PO_4^{3-} ($\sim 0,01 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$). Obecność tych jonów została wykryta tylko w próbkach zebranych w rzece powyżej zbiornika oraz na końcu odcinka badawczego przy wylocie rzeki z Himalajów. Brak jonów PO_4^{3-} w wodzie zmagazynowanej w zbiorniku jest prawdopodobnie związany z jego aktywnym poborem przez organizmy żywe.

W pobranych próbach wody średnie stężenie kationów wyrażone w $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ wykazuje następującą kolejność: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$. Średnia zawartość wapnia i sodu to odpowiednio 63% i 23% całkowitego stężenia kationów. Zawartość jonów magnezu, potasu i amonu jest wyraźnie mniejsza i razem stanowią zaledwie 14% całkowitej ilości kationów. Analiza zmian stężenia anionów w profilu podłużnym Tisty (ryc. 1, tab. 1) wykazała, że nowo powstały zbiornik przyczynia się do zmniejszenia stężenia jonów Na^+ , Mg^+ i K^+ oraz zwiększenia stężeń jonów Ca^{2+} i NH_4^+ .

Najwyższe stężenie Ca^{2+} zaobserwowano na początku odcinka badawczego ($14,6 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$). Zmniejszyło się ono wyraźnie – do $12,1 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ na granicy rzeki i cofki zbiornika poniżej ujścia Rangitu. Stężenie Ca^{2+} wzrosło do $13,4 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w zbiorniku i do $13,9 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ przy wylocie rzeki z gór. Zawartość wapnia w wodzie na badanym obszarze związana jest z wietrzeniem węglanów i minerałów krzemianowych zawartych w skałach budujących zlewnię. Badania przeprowadzone przez V. Subramaniana (2004) oraz A.K. Singha i innych (2005a, b) również wskazują na wysoki udział Ca^{2+} w składzie chemicznym wody w rzekach i zbiornikach dorzecza Brahmaputry i obszarów sąsiednich.

Obecność jonów NH_4^+ stwierdzono we wszystkich próbkach pobranych z Tisty; w profilu podłużnym badanego odcinka rzeki ich stężenie rośnie z $0,12 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ do $0,18 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Ten wzrost oraz opisany wcześniej spadek stężenia NO_3^- wskazuje na redukcję azotanów do amoniaku, całkowite stężenie amoniaku nie przekracza jednak poziomu typowego dla wody rzecznej $0,2 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$.

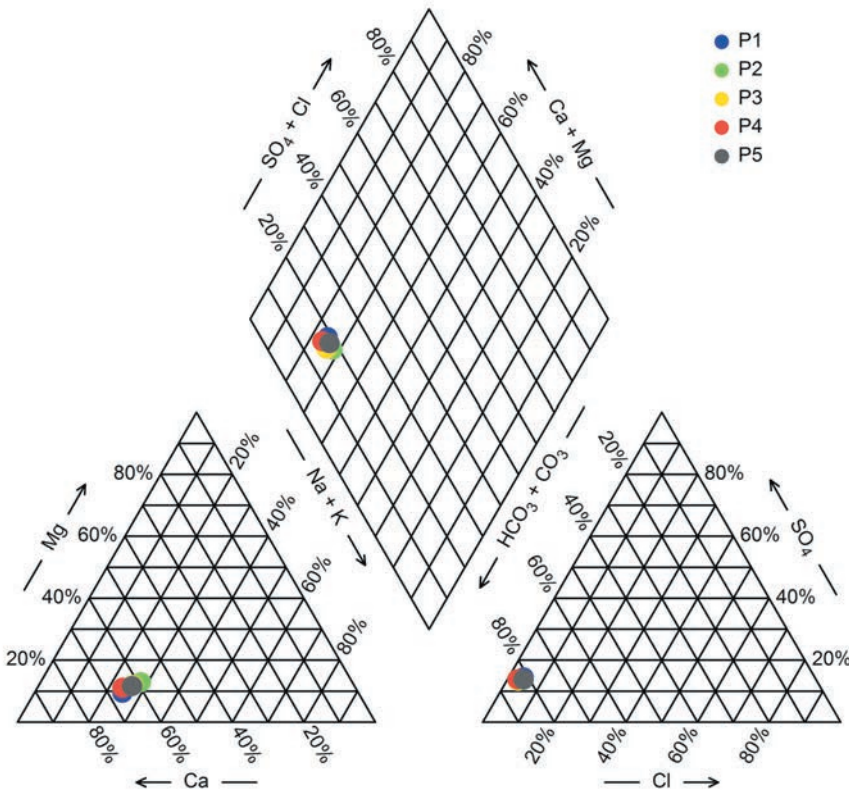
Zawartość jonów K^+ w rzece powyżej zbiornika była bardzo niska – $1,4 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, a w zbiorniku oraz w wodzie wypływającej z niego jeszcze zmalało, do $1,3 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Przy wylocie rzeki z Himalajów stężenie potasu było podobne do obserwowanego powyżej zbiornika. Potas w wodzie Tisty pochodzi głównie z wietrzenia minerałów krzemianowych, zawartych w skałach zarówno metamorficznych, jak i osadowych. Wskazuje na to wyższa jego zawartość w rzece na odcinku powyżej i poniżej zbiornika. Przyczyną obniżenia jego koncentracji w zbiorniku jest prawdopodobnie przyswajanie potasu przez organizmy wodne.

Najniższe stężenie jonów Na^+ stwierdzono w wodzie wypływającej ze zbiornika ($5,1 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$). Na końcu odcinka badawczego stężenie jonów sodu wynosiło do $5,6 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ i było podobne do obserwowanego w rzece powyżej zbiornika.

Głównym źródłem sodu w wodzie Tisty jest wietrzenie minerałów krzemianowych. Niewielkie ilości Na^+ mogą być również deponowane na powierzchni gleby wraz z deszczem, zwłaszcza w południowej części zlewni o wysokich opadach.

Zawartość Mg^{2+} na odcinku rzeki powyżej zbiornika wzrosła z $1,3 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w Sikkimie do $1,6 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ poniżej ujścia Rangitu. W zbiorniku nastąpiło zmniejszenie stężenia magnezu do $1,4 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ i jego podobny poziom ($1,5 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) obserwowano do końca profilu pomiarowego. Stężenie Mg_2^+ jest na ogół niskie, a nieznaczne zmiany jego koncentracji obserwowane wraz z biegiem rzeki są zależne od wietrzenia gnejsów zawierających biotyt i niektórych skał węglanowych budujących odpowiednio środkową i południową część zlewni Tisty w Himalajach.

Skład chemiczny wód Tisty uwzględniający podstawowe kationy i aniony przedstawia wykres A.M. Pipera (1944) – rycina 3. Dominacja kationów wapnia i anionów wodorowęglanowych decyduje o sklasyfikowaniu wód Tisty jako



Ryc. 3. Skład chemiczny wody Tisty w profilu podłużnym Tisty w Himalajach Dardżylińskich w porze pomonsonowej w latach 2013-2015

The chemical composition of post-monsoon waters of the longitudinal profile of the River Teesta, 2013-2015

Ca-HCO₃. Na wykresie nie występuje zróżnicowanie typu wód między górną a dolną częścią badanego profilu oraz w zbiorniku zaporowym. Wskazuje to, że wietrzenie chemiczne oraz zasilanie gruntowe decydują w głównym stopniu o składzie chemicznym Tisty w okresie pomonsunowym.

Jony metali

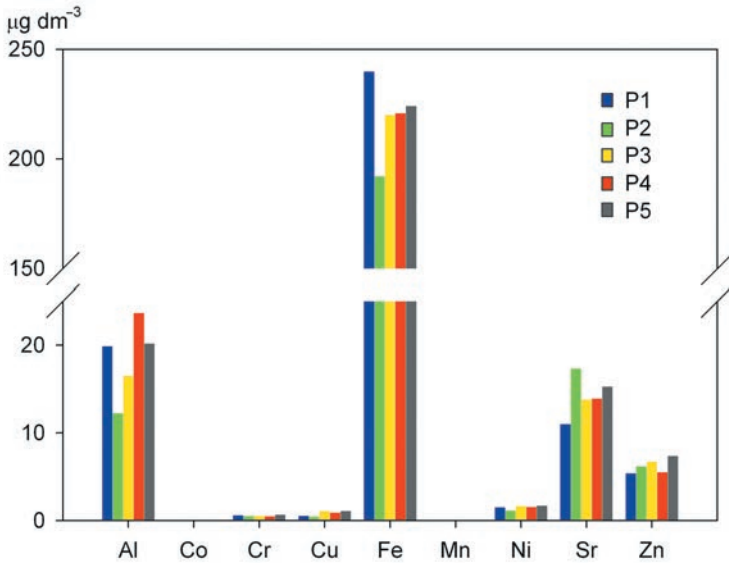
Średnie wartości stężenia metali w wodzie Tisty wyrażone w meq·L⁻¹ układają się w następującej kolejności: Fe>Al>Sr>Zn>Ni>Cr>Cu>Mn>Co (tab. 2, ryc. 4). Dominują jony Fe, Al i Sr, których udział wynosi odpowiednio 88%, 7% i 4% całkowitej zawartości metali ciężkich. Wartości stężenia Pb i Cd były poniżej granicy wykrywalności.

Tabela 2. Średnie stężenie jonów metali ($\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$) w profilu podłużnym Tisty w Himalajach Dardżylińskich w porze pomonsunowej w latach 2013-2015

Mean concentrations of metal ions in the Teesta between Sikkim and the margin of the Himalaya in the post-monsoon period (2013-2015)

Jony metali <i>Ions</i>	P1		P2		P3		P4		P5	
	średnia <i>mean</i>	odch.st. <i>Std dev.</i>	średnia <i>mean</i>	odch.st. <i>Std dev.</i>	średnia <i>mean</i>	odch.st. <i>Std dev.</i>	średnia <i>mean</i>	odch.st. <i>Std dev.</i>	średnia <i>mean</i>	odch.st. <i>Std dev.</i>
Al	19,89	21,83	12,23	7,78	16,52	17,47	23,67	29,10	20,18	15,21
Co	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01
Cr	0,59	0,32	0,52	0,15	0,56	0,24	0,49	0,28	0,66	0,27
Cu	0,55	0,47	0,45	0,23	1,08	1,12	0,91	1,06	1,10	1,13
Fe	239,86	173,92	192,16	136,52	220,10	153,38	220,87	158,50	224,10	158,66
Mn	0,03	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04	0,07	0,05	0,06
Ni	1,51	0,97	1,16	1,04	1,66	1,46	1,53	1,30	1,69	1,50
Sr	11,02	2,88	17,34	1,90	13,83	3,18	13,91	2,95	15,27	2,92
Zn	5,39	7,10	6,17	9,83	6,74	8,54	5,53	7,27	7,38	10,11

Jednakże zmiany stężenia poszczególnych metali wzdłuż podłużnego profilu rzeki są bardzo zróżnicowane (ryc. 1, tab. 2). Jony Fe wykazywały tendencję spadkową od 240 $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ na początku odcinka badawczego do 192 $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ poniżej ujścia Rangitu. W zbiorniku oraz w wodzie wypływającej z niego, stężenie Fe wzrastało do 220-221 $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ i na podobnym poziomie obserwowano je na końcu analizowanego odcinka rzeki. Zawartość jonów Al wyraźnie zmalała na granicy rzeki i cofki zbiornika poniżej ujścia Rangitu (12,2 $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$). W wodzie wypływającej ze zbiornika ich stężenie wzrosło do poziomu obserwowanego powyżej ujścia Rangitu (23,7 $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$). Wysokie stężenie Sr w wodzie rzek himalajskich jest wynikiem wietrzenia skał węglanowych i krzemianowych



Ryc. 4. Średnie stężenia jonów metali w wodzie Tisty w profilu podłużnym Tisty w Himalajach Dardżylińskich w porze pomonsunowej w latach 2013-2015

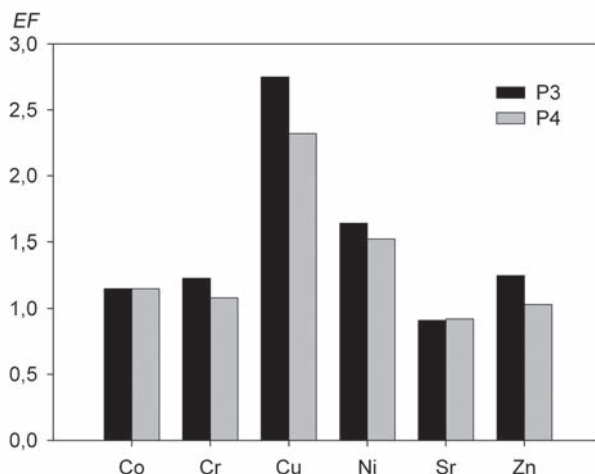
Mean metal-ion concentrations in the post-monsoon waters of the longitudinal profile of the River Teesta, 2013-2015

(Galy i inni, 1999). Powyżej zbiornika zawartość Sr rosła wraz z biegiem rzeki z $11,0 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ do $17,3 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$. Pomimo że w zbiorniku jego stężenie zmalało do $13,8 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$, poniżej zapory zaobserwowano ponownie nieznaczny wzrost do $15,3 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$.

Zmiany stężenia Ni, Zn, Cu, Cr i Mn w profilu podłużnym rzeki Tisty były podobne. W przeciwieństwie do Fe, Al i Sr, jony te występują w wodzie rzeki Tisty w śladowych ilościach. W przypadku Ni stężenie jego jonów zmniejszyło się z $1,5 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ do $1,2 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ na granicy cofki i rzeki, a następnie zwiększyło do $1,7 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ w zbiorniku, a podobne stężenie utrzymywało się do końca odcinka badawczego. Zawartość Zn w rzece powyżej zbiornika zmieniała się z $5,4 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ do $6,2 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$, wzrosła do $6,7 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ w zbiorniku, a następnie wykazywała nieznaczny trend wzrostowy poniżej zapory (z $5,5 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ do $7,4 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$). Stężenie Cu także znacznie zwiększyło się w zbiorniku i w rzece poniżej zapory ($0,9$ - $1,1 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$) w stosunku do koncentracji obserwowanej powyżej zbiornika ($0,5$ - $0,6 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$). Spadek stężenia w rzece powyżej zbiornika obserwowano też w przypadku jonów Mn (z $0,03$ do $0,00 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$). Następnie wartość ta wzrastała w wodzie wypływającej ze zbiornika i w rzece przy wylocie z Himalajów (do $0,04$ - $0,05 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$). Zawartość Co i Cr była podobna we wszystkich zebranych próbkach i wynosiła odpowiednio $0,02$ - $0,03 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ i $0,5$ - $0,7 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$.

Wpływ zbiornika retencyjnego na stężenia jonów metali został obliczony na podstawie znormalizowanego współczynnika wzbogacenia EF (Abraham i Parker, 2008). Zawartość jonów metali w wodzie powyżej zbiornika (P2) była traktowana jako wartość odniesienia do obliczania współczynnika wzbogacenia dla wody w zbiorniku (P3) oraz rzeki bezpośrednio poniżej zapory (P4). Poziom stężenia jonów metali był interpretowany zgodnie z wytycznymi G.F. Bircha i M.A. Olmosa (2008), według których $EF < 1,50$ oznacza brak wzbogacenia, $1,50 < EF < 3,00$ niewielkie wzbogacenie, $3,00 < EF < 5,00$ umiarkowane wzbogacenie.

Wzbogacenie stężenia jonów metali (EF) w środkowej części zbiornika (P3) układało się w kolejności $Cu > Ni > Zn > Cr > Co > Sr$, natomiast wzbogacenie stężenia jonów metali poniżej zbiornika (P4) przyjęło kolejność $Cu > Ni > Co > Cr > Zn > Sr$. Najwyższy EF w obu badanych miejscach dotyczył jonów Cu i przyjął wartość 2,75 (niewielkie wzbogacenie) oraz 2,32 (niewielkie wzbogacenie) odpowiednio w środku (P3) i poniżej zbiornika (P4) (ryc. 5). Niższe wartości EF dotyczyły jonów Ni: 1,84 i 1,52 odpowiednio dla punktów P3 i P4. W przypadku pozostałych metali ciężkich wartości EF były bliskie 1,00, dla wody zarówno w zbiorniku, jak i poniżej zapory. Brak wzbogacenia wody w te jony po przejściu przez zbiornik wskazuje, że ich źródłem są obszary powyżej zbiornika, a sam zbiornik i niewielkie dopływy Tisty wpływają w niewielkim stopniu na stężenia jonów metali. Równocześnie odnotowane niższe wartości współczynnika EF w rzece poniżej zapory są skutkiem procesu samooczyszczania wody w zbiorniku.



Ryc. 5. Średnie wartości współczynnika wzbogacenia (EF) jonów metali w wodzie zbiornika oraz w Tście poniżej zapory w latach 2013-2015

Mean metal-ions enrichment factor (EF) characterising the waters of the Teesta Reservoir and River Teesta below the dam, 2013-2015

Wnioski

Przeprowadzona analiza właściwości fizykochemicznych oraz składu chemicznego wody Tisty w okresie pomonsunowym, której celem było określenie roli nowo wybudowanego zbiornika w kształtowaniu hydrochemicznego profilu himalajskiego biegu rzeki, pozwala na sformułowanie następujących wniosków.

1. Woda w Tiście ma odczyn zasadowy. HCO_3^- , i SO_4^{2-} , są dominującymi anionami, natomiast Ca i Mg – dominującymi kationami. Wietrzenie chemiczne skał budujących podłoże zlewni jest najbardziej istotnym czynnikiem wpływającym na skład chemiczny wody.
2. Obniżenie temperatury wody spowodowane przez spiętrzenie wody w zbiorniku jest niewielkie i wynosi około $1,0^\circ\text{C}$. Niski zakres zmian wskazuje na wykształcenie bardzo słabej stratyfikacji termicznej w zbiorniku ze względu na szybką wymianę wody. Suma substancji rozpuszczonych wykazuje zmienność w wąskim zakresie, natomiast wartości ANC wskazują, że nie ma ryzyka zakwaszenia wody w rzece na analizowanym odcinku.
3. Nowo wybudowany zbiornik powoduje zmniejszenie stężenia większości podstawowych jonów Cl^- , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , NO_3^- oraz PO_4^{3-} . Odwrotny trend obserwowano tylko w przypadku jonów Ca^{2+} , SO_4^{2-} oraz NH_4^+ . Zbiornik nie wpływa na koncentrację jonów F^- .
4. W zbiorniku obserwuje się nieznaczny wzrost stężenia większość jonów metali takich jak Cu, Ni, Zn, Cr, C i S. Niższa zawartość tych jonów w rzece poniżej zapory wskazuje na procesy samooczyszczania wody z metali w zbiorniku.
5. Zmiany właściwości fizykochemicznych oraz stężeń jonów spowodowane przez zbiornik są zwykle niwelowane przez czynniki środowiskowe jeszcze na obszarze Himalajów, w odległości do 15 km poniżej zapory.

Wyniki przeprowadzonych badań są istotne w świetle prowadzonej budowy kolejnego zbiornika w zlewni Tisty (kilkanaście kilometrów poniżej zbiornika będącego przedmiotem analizy w niniejszym opracowaniu) oraz planowanych realizacji następnych zapór. W celu określenia kierunku i skali zmian hydrochemicznych rzeki Tisty spowodowanych funkcjonowaniem powstającej kaskady zbiorników niezbędne jest kontynuowanie monitoringu.

Piśmiennictwo / References

- Abraham G.M.S., Parker R.J., 2008, *Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand*, Environmental Monitoring and Assessment, 136, 1-3, s. 227-238.
- Acharyya S.K., 1980, *Structural framework and tectonic evolution of the Eastern Himalaya*, Himalayan Geology, 10, s. 412-439.

- Allan J.D., Castillo M.M., 2007, *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters*, Springer Science & Business Media.
- Bhattacharyya K., Mitra G., 2012, *Geometry and kinematics of the Darjeeling-Sikkim Himalaya, India: Implications for the evolution of the Himalayan Fold-Thrust Belt*, EGU General Assembly Conference Abstracts, 14, 4226.
- Bi S.P., An S.Q., Liu F., 2001, *A practical application of Driscoll's equation for predicting the acid-neutralizing capacity in acidic natural waters equilibria with the mineral phase gibbsite*, Environment International, 26, 5, s. 327-333; doi: 10.1016/S0160-4120(01)00008-3.
- Birch G.F., Olmos M.A., 2008, *Sediment-bound heavy metals as indicators of human influence and biological risk in coastal water bodies*, ICES, Journal of Marine Science, 65, 8, s. 1407-1413.
- Bookhagen B., Burbank D.W., 2010, *Towards a complete Himalayan hydrological budget: The spatiotemporal distribution of snow melt and rainfall and their impact on river discharge*. Journal of Geophysical Research-Earth Surface, 115 (F3); doi:10.1029/2009jf001426.
- CISMHE (Centre for Inter Disciplinary Studies of Mountain and Hill Development), 2006, *Carrying Capacity Study of Teesta Basin in Sikkim. Volume IV: Water Environment*, New Delhi.
- Champion H.G., Seth S.K., 1968, *A Revised Survey of Forest Types of India*, Manager Publications, New Delhi.
- Chapman D.V. (red.), 1996, *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments, and Water in Environmental Monitoring*, 2nd ed., UNESCO, World Health Organization, United Nations Environment Programme, London.
- Fairchild G.W., Velinsky D.J. 2006, *Effects of small ponds on stream water chemistry*, Lake and Reservoir Management, 22, s. 321-330.
- Galy A., France-Lanord C., Derry L.A., 1999, *The strontium isotopic budget of Himalayan rivers in Nepal and Bangladesh*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 63, s. 1905-1925.
- Gao Y., Wang B., Liu X., Wang Y., Zhang J., Jiang Y., Wang F., 2013, *Impacts of river impoundment on the riverine water chemistry composition and their response to chemical weathering rate*, Frontiers of Earth Science, 7, s. 351-360.
- Grumbine R.E., Pandit M.K., 2013, *Threats from India's Himalaya dams*, Science, 339, 6115, s. 36-37.
- Hannan H.H., 1979, *Chemical modifications in reservoir-regulated streams*, [w:] J.V. Ward, J.A. Stanford (red.), *The Ecology of Regulated Streams*, Springer US, s. 75-94.
- Harrison J.A., Maranger R.J., Alexander R.B., Giblin A.E., Jacinthe P.A., Mayorga E., Wollheim W.M., 2009, *The regional and global significance of nitrogen removal in lakes and reservoirs*, Biogeochemistry, 93, 1-2, s. 143-157.
- Hem J.D., 1985, *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*, 2254, Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hemond H.F., 1990, *Acid Neutralizing Capacity, Alkalinity, and Acid-Base Status of Natural Waters Containing Organic Acids*, Environmental Science and Technology, 24, 10, s. 1486-1489.
- Livingstone D.A., 1963, *Chemical Composition of Rivers and Lakes*, US Government Printing Office, Washington.
- Mahanta C., Subramanian V., 2004, *Water quality, mineral transport and sediment biogeochemistry*, [w:] V. Singh, N. Sharma, C.S.P. Ojha (red.), *The Brahmaputra Basin Water Resources*, 47, Springer Science & Business Media, s. 376-400.

- Murray J.A., Bochin N.A., 1973, *Instructions for Compilation of the Chapter on Catastrophic Floods for the UNESCO Publication "Annual Summary of Information on natural Disasters"*, Forms with Explanatory Notes, UNESCO, Paris.
- Nikanorov A.M., Brazhnikova L.V., 2009, *Types and Properties of Water, 2: Water Chemical Composition of Rivers, Lakes and Wetlands*, Encyclopedia of Life Support Systems.
- 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, s. 71-83.
- Piper A.M., 1944, *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses*, Eos, Transactions American Geophysical Union, 25, 6, s. 914-928.
- Prokop P., Płoskonka D., 2014, *Natural and human impact on the land use and soil properties of the Sikkim Himalayas piedmont in India*, Journal of Environmental Management, 138, s. 15-23.
- Reuss J.O., Johnson D.W., 1986, *Acid Deposition and the Acidification of Soils and Water*, Ecological Studies, 59, Springer.
- Rigacci L.N., Giorgi A.D., Vilches C.S., Ossana N.A., Salibián A., 2013, *Effect of a reservoir in the water quality of the Reconquista River, Buenos Aires, Argentina*, Environmental Monitoring and Assessment, 185, 11, s. 9161-9168.
- Sharma S.K., Subramanian V., 2008, *Hydrochemistry of the Narmada and Tapi Rivers, India*, Hydrological Processes, 22, 17, s. 3444-3455.
- Singh A.K., Mondal G.C., Singh P.K., Singh S., Singh T.B., Tewary B.K., 2005, *Hydrochemistry of reservoirs of Damodar River basin, India: weathering processes and water quality assessment*, Environmental Geology, 48, 8, s. 1014-1028.
- Singh S.K., Sarin M.M., France-Lanord C., 2005, *Chemical erosion in the eastern Himalaya: Major ion composition of the Brahmaputra and $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved inorganic carbon*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 69, 14, s. 3573-3588.
- Soja R., Wiejaczka Ł., 2014, *The impact of a reservoir on the physicochemical properties of water in a mountain river*, Water and Environment Journal, 28, 4, s. 473-482; doi: 10.1111/wej.12059.
- Starkel L., Basu S. (red.), 2000, *Rains, Landslides and Floods in the Darjeeling Himalaya*, INSA, New Delhi.
- Subramanian V., 2004, *Water quality in south Asia*, Asian Journal of Water, Environment and Pollution, 1, 1-2, s. 41-54.
- Vörösmarty C.J., Fekete B.M., Tucker B.A., 2004, *Monthly mean river discharge at gauging station Anderson Bridge*, doi: 10.1594/PANGAEA.218327.
- Zhao Q., Liu S., Deng L., Yang Z., Dong S., Wang C., Zhang Z., 2012, *Spatio-temporal variation of heavy metals in fresh water after dam construction: a case study of the Manwan Reservoir, Lancang River*, Environmental Monitoring and Assessment, 184, 7, s. 4253-4266.

[Wpłynęło: lipiec; poprawiono: listopad 2016 r.]

LUKASZ WIEJACZKA, PAWEŁ PROKOP, RAFAŁ KOZŁOWSKI, SUBIR SARKAR

IMPACT OF A DAM RESERVOIR ON THE CHEMISTRY OF A HIMALAYAN RIVER
(THE TEESTA, INDIA)

In the light of a growing demand for energy, the government of India has decided to tap into the potential of rivers by building numerous hydroelectric plants, with a view to doubling the amount of energy produced by water. One of the regions in which such plants are being built is the basin of the River Teesta (as a right-bank tributary of the Brahmaputra).

The main aim of this article has been to present chemical-composition characteristics and physico-chemical parameters of water in the Teesta in its Himalayan course, with account being taken of the role the newly-built reservoir plays in shaping the chemistry of water in the river.

Fieldwork entailed measurement of physico-chemical parameters of the water, as well as sampling for the purposes of chemical analysis. This was done in the post-monsoon period in the years 2013-2015. Sampling and measuring points were located along the Teesta in the Darjeeling Himalaya, over a length of approximately 43 km, between the borders of Sikkim and West Bengal and the southern margin of the Himalayas. Above the newly-built reservoir, measurements were made at points P1 and P2; while within it, measurements were made and samplings taken in the centre (at P3 by the shore). The two points located below the dam were P4 and P5.

The results of the analysis of main physico-chemical properties and chemical composition data for the water in the Teesta allowed conclusions as detailed in the following points to be drawn.

The decrease in water temperature caused by the reservoir is slight, at approximately 1.0°C, with the indication being that very weak thermal stratification has developed, due to the rapid exchange of water in the reservoir. As for Total Dissolved Solids, marked stability of values across a narrow range is to be observed. The values for ANC in turn indicate that there is no risk of acidification at any point along the section examined.

The newly-built reservoir is responsible for a decrease in concentrations of most of the main ions (i.e. Cl⁻, K⁺, Na⁺, Mg²⁺, NO₃⁻ and PO₄³⁻). The reverse trend was only to be observed in respect of Ca²⁺, SO₄²⁻ and NH₄⁺. The dam does not influence F⁻ concentrations.

The reservoir causes minor enrichment of water in ions of most metals like Cu, Ni, Zn, Cr, C and Sr. The more limited enrichment of water in the Teesta below the dam indicates self-purification processes taken place in the Teesta Reservoir where metals are concerned.

The changes in physico-chemical properties and concentrations of ions caused by the reservoir are usually normalised by environmental factors before the Teesta exits the Himalayas (i.e. within 15 km of the reservoir).

The results of the study are relevant, in light of the construction of several further reservoirs in the Teesta catchment in the near future, which can lead to significant transformations of the natural environment, including hydrochemical changes that determine water quality.



Informacja dla Autorów

Information for Authors see: www.igipz.pan.pl/home_en...

Przegląd Geograficzny publikuje oryginalne prace teoretyczne, metodologiczne i empiryczne (**niebędące przyczynkami ani wstępnymi wynikami badań**) z zakresu szeroko pojmowanej problematyki geograficznej i przestrzennego zagospodarowania kraju. Zapraszamy do współpracy z naszym kwartalnikiem przez nadsyłanie wartościowych artykułów i notatek, materiałów dyskusyjnych, recenzji (w tym oprogramowania geograficznego) oraz sprawozdań. Przestrzeganie poniższych zaleceń formalnych usprawni prace redakcyjne i przyczyni się do szybszej publikacji nadsyłanych materiałów. W korespondencji z Redakcją prosimy o korzystanie z poczty elektronicznej (l.kwiat@twarda.pan.pl).

Uwagi ogólne. Złożenie przez Autora tekstu do Przeglądu Geograficznego oznacza, że materiał **nie jest przewidziany do druku** ani nie był drukowany w **innym wydawnictwie**. Jest także jednoznaczne ze zgodą na jego rozpowszechnianie przez IGIPZ PAN w formie drukowanej i elektronicznej na licencji CC-BY.

Przesyłanie materiałów:

- drogą elektroniczną, z powklejnymi rycinami i tabelami, w łatwym do odczytania formacie (Word, ew. PDF, ale wówczas dane o autorze trzeba zamieszczać na osobnej stronie, a nie tytułowej artykulu) – w tej postaci zostaną skierowane do recenzji;
- tradycyjną pocztą, jako wydruk komputerowy, w trzech egzemplarzach całości, łącznie z rycinami i tabelami.

Opracowanie powinno być napisane zwięźle, ale jasno, w edytorze MS Word for Windows i mieć następującą **objętość**: artykuł – około 5000-5500 słów (łącznie z piśmiennictwem, przypisami, streszczeniem angielskim i tabelami); notatka i materiał dyskusyjny – maksymalnie do 4000 słów; recenzja i sprawozdanie – 800-1200 słów. Manuskrypt należy wydrukować jednostronnie z podwójną interlinią i szerokimi marginesami. Autorzy-obcokrajowcy proszeni są o nadsyłanie zweryfikowanych tekstów w języku angielskim, gdyż w tym języku będą publikowane ich prace.

Strona tytułowa. Na pierwszej stronie prosimy w kolejności umieścić: tytuł pracy w języku polskim, tytuł w języku angielskim, imię i nazwisko autora(-ów), afiliację, adres(y), e-mail(e), zarys treści (nie dłuższy niż 200 słów), słowa kluczowe. Nie więcej niż 6 słów kluczowych, podanych w osobnym wierszu, powinno dotyczyć: jedno – tematu, jedno – obszaru, jedno – metody badawczej, oraz trzy inne. Dane autora(-ów) nie powinny pojawić się w innym miejscu pracy, gdyż jest ona anonimowo przesyłana do recenzentów.

Tekst (w wersji finalnej, nie tej przeznaczonej dla recenzentów) nie powinien zawierać wyróżnień ani podkreśleń. Śródtytuły, maksymalnie trzystopniowe, można zaznaczyć ołówkiem na marginesie. Prosimy o ograniczenie liczby i objętości przypisów do niezbędnego minimum. Przypisy, numerowane kolejno, należy umieścić na końcu artykułu. Ilustracji i tabel nie należy wklejać do tekstu, lecz drukować je na oddzielnych stronach. Proponowane miejsce ich zamieszczenia można zaznaczyć.

Przy powoływaniu się na piśmiennictwo, należy podawać nazwisko autora oraz rok publikacji, a przy cytowaniu również numer strony, np. według A. Nowaka (1999, s. 5). W powołaniach na więcej prac tego samego autora, które ukazały się w tym samym roku stosuje się: (Bunge, 1987a, b). W przypadku wspólnej publikacji dwóch autorów podaje się: (Marshall i Wood, 1995), a trzech i więcej autorów: (Ford i inni, 1996); w wykazie piśmiennictwa, jednakże, należy podać wszystkich autorów.

Piśmiennictwo, ograniczone do literatury cytowanej, w porządku alfabetycznym, należy opracować bez skrótów, zgodnie z ostatnimi wydanymi zeszytami kwartalnika lub według opisu na stronie internetowej: www.igipz.pan.pl/przegląd-geograficzny.

W przypadkach wątpliwych (np. Occasional papers) prosimy podawać wszystkie dane bibliograficzne.

Tabele powinny być opracowane podobnie jak w bieżących zeszytach kwartalnika, w programach MS Word lub Excel. Każda tabela powinna zawierać zwięzły tytuł (w języku polskim i angielskim) i kolejny numer (u góry) oraz źródło danych (u dołu). Główna tabela powinna być dwujęzyczna. Prosimy nie stosować edycji ramek, cieniowania wierszy i kolumn, itp.

Ilustracje (dotyczy wersji końcowej, nie recenzowanej). Fotografie powinny być wykonane na odpowiednim poziomie technicznym, a mapy – zgodnie z zasadami kartografii. Wykresy, diagramy i mapy, opisane jako ryciny, powinny mieć jednolitą numerację; tytułów nie należy umieszczać na rycinach. Podpisy fotografii i rycin, w języku polskim i angielskim, powinny być zebrane na osobnej kartce. Objaśnienia oznaczeń (legendy), dwujęzyczne, należy zamieszczać na rysunkach, a nie w formie odsyłaczy do podpisu. Ryciny przygotowane komputerowo powinny być zapisane w formacie EPS, JPG ew. TIFF lub PDF.

Streszczenie. Autor powinien dostarczyć streszczenie w języku angielskim, jeśli to możliwe – zweryfikowane przez *native-speaker*. Objętość streszczenia: 0,8-1,0 strony (400-500 słów). Osobno prosimy dołączyć zarys treści i słowa kluczowe przetłumaczone na język angielski, poprzedzone nazwiskiem autora i tytułem artykułu – ten fragment jest potrzebny do celów bibliograficznych i należy go zapisać jako oddzielny plik.

Procedura recenzowania. Procedurze recenzyjnej podlegają wszystkie artykuły oryginalne i przeglądowe, po wstępnej kwalifikacji formalnej dokonanej przez Redakcję. Każdy artykuł jest kierowany do nie mniej niż dwóch kompetentnych recenzentów, z zachowaniem zasady poufności i dwustronnej anonimowości. W przypadku publikacji w języku obcym, co najmniej jeden z recenzentów jest afiliowany w jednostce zagranicznej z siedzibą w innym kraju niż autor opracowania. Recenzenci na piśmie formułują swoje uwagi i zalecenia, a także końcowy wniosek, czy skierowane do nich opracowanie zasługuje na publikację. Autor otrzymuje recenzje z prośbą o ustosunkowanie się do uwag i dokonanie sugerowanych poprawek. Niezastosowanie się do nich wymaga pisemnego uzasadnienia. Ostateczną decyzję co do kwalifikacji materiału i terminu jego opublikowania podejmuje Redakcja.

Akceptacja materiału, zapis elektroniczny. Po uzyskaniu pozytywnych recenzji i wprowadzeniu ewentualnych poprawek do artykułu lub notatki, autor dostarcza ostateczną wersję materiału w postaci wydruku wraz z zapisem cyfrowym; obie wersje muszą być identyczne. W przypadku materiałów dyskusyjnych, recenzji i sprawozdań autor może dostarczyć plik za pośrednictwem poczty elektronicznej bądź na CD.

Korekta ogranicza się do poprawienia błędów technicznych, dlatego prosimy autorów o dostarczanie wyłącznie dopracowanych tekstów. Korekta powinna być wykonana i odesłana niezwłocznie.

Pozostałe uwagi (szczegóły na: www.igipz.pan.pl/przeglad-geograficzny)

- Przekazanie pracy do druku oznacza, że po jej opublikowaniu właścicielem copyright staje się wydawca. Autor każdej publikacji jest proszony o wyrażenie zgody na upowszechnianie jej w formie cyfrowej.
- Redakcja zastrzega sobie prawo skracania i adiustacji stylistycznej tekstów.
- Po wydrukowaniu, autor otrzymuje bezpłatnie 20 nadbitek artykułu, a po kilka egzemplarzy pozostałych materiałów. Na życzenie może też otrzymać plik PDF opublikowanego opracowania.