



WIELKOŚĆ TURBULENCJI W PODSTAWOWYCH JEDNOSTKACH HYDROMORFOLOGICZNYCH RZEK GÓRSKICH NA PRZYKŁADZIE ODCINKA SKAWY

Agnieszka Woś

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie

THE TURBULENCE VALUE IN BASIC HYDROMORPHOLOGICAL UNITS OF MOUNTAIN RIVER IN EXAMPLE OF SKAWA RIVER SECTION

Streszczenie

Celem przedstawionej pracy jest analiza wielkości turbulencji w podstawowych jednostkach hydromorfologicznych rzeki górskiej na przykładzie odcinka Skawy. Pomiary składowych prędkości chwilowej sondą MicroADV w ośmiu losowych lokalizacjach na poziomie 20% i 40% głębokości lokalnej wykonano w czterech jednostkach hydromorfologicznych – płoso, nurt, bystrze i rwący nurt. Na podstawie uzyskanych wartości obliczono lokalne wartości prędkości wypadkowej oraz parametry ruchu turbulentnego: intensywność turbulencji i turbulentną energię kinetyczną. Wyniki badań wskazują na duże zróżnicowanie lokalnych wartości parametrów turbulencji w obrębie jednostki. Wielkość turbulencji wzrasta wraz z prędkością układając jednostki w kolejności płoso, nurt, rwący nurt, bystrze. Zauważono wzrost wielkości turbulencji w kierunku dna w jednostkach o niskiej prędkości przepływu – płoso i nurt, natomiast w jednostkach o wyższej prędkości (bystrze i rwący nurt) nie wykazały jednoznacznie podobnej tendencji.

Abstract

The aim of this study is to analyze the turbulence value in the basic hydromorphological units of mountain river in the example of the Skawa river section. In four hydromorphological units – pool, run, riffle, rapid in eight random locations the instantaneous velocity components were measured using MicroADV at 20% and 40% of the local depth. On the basis of the measurement the value of the local velocity and turbulent motion parameters: turbulence intensity and turbulent kinetic energy were calculated. The results show a large variation in local turbulence parameters within the one unit. The value of turbulence parameters increases with velocity values and ordering unit as follows pool, run, rapid, riffle. It was noticed that turbulence increased towards to river bed in units of low flow velocity values – pool and run. While units with higher flow velocity (riffle and rapid) did not show similar trend.

WPROWADZENIE

Morfologia koryta jest jednym z podstawowych czynników składających się na warunki siedliskowe organizmów żyjących w ekosystemach rzecznych. Charakterystyką morfologii jest występowanie w korycie rzeki wyróżnianych jednostek hydromorfologicznych. Jednostka hydromorfologiczna jest to przestrzeń życiowa dla organizmów wodnych; czasowo i przestrzennie dynamiczna jednostka wykształcona na podstawie interakcji hydromorfologii koryta i reżimu hydrologicznego (Maddock, 1999). Z praktycznego punktu widzenia jest to obszar w korycie ciek, znajdujący się w strefie o jednolitych parametrach przepływu wody takich jak napętnienie i prędkość wody. W ekologii natomiast jest to abiotyczny składnik siedliska (Harvey i Clifford, 2010).

Biolodzy często używają pojęcia siedlisko do określenia różnorodności ciek pod względem warunków hydraulicznych w jakich bytują organizmy wodne (Kownacki i Soszka, 2004). Ze względu na to, że siedlisko i jego rodzaj najczęściej rozpatrywany jest w obrębie formy morfologicznej i pozostaje z nią powiązany, siedlisko stało się synonimem jednostki hydromorfologicznej (Parasiewicz, 2007). Przywrócenie różnorodności gatunkowej w ekosystemie wymaga zróżnicowania koryta pod względem morfologii. Różnorodność jednostek hydromorfologicznych stało się narzędziem do oceny obecnego stanu ekologicznego rzek jak również oceny efektywności działań prowadzących do poprawy tego stanu (Jowett, 1993; Parasiewicz, 2007; Książek i Bartnik, 2009; Mouton i in., 2009). Identyfikacja podstawowych jednostek hydromorfologicznych jest przedmiotem wielu badań i projektów renaturyzacji. Proponowano rozróżnienia na podstawie kryteriów zawierających charakterystykę rumowiska

denne, spadku zwierciadła wody, głębokości wody i prędkości średnich, topografii dna, liczby Froude'a oraz opis zachowania zwierciadła wody. Identyfikacja i parametryzacja jednostek hydromorfologicznych jest obecnie centralnym punktem w zarządzaniu systemami wodnymi szczególnie w USA. Taka koncepcja umożliwia przewidywanie, ocenę i projektowanie układu siedlisk w rzece (Clifford i in., 2006). Najczęściej stosowane rozróżnienia jednostek hydromorfologicznych biorą pod uwagę obserwację topografii dna i zwierciadła wody, takie podejście jest użyteczne ponieważ jest możliwe do stosowania zarówno przez biologów jak i geomorfologów czy inżynierów. Zachowanie powierzchni wody odzwierciedla warunki hydrauliczne danej jednostki jak prędkość, głębokość, uziarnienie dna (Clifford i in., 2006; Harper i Everard, 1998; Jowett, 1993).

Do tej pory badania warunków hydraulicznych w siedliskach – jednostkach hydromorfologicznych były skupione na czasowym i przestrzennym uśrednianiu prędkości i głębokości. Wielu badaczy wskazuje na potrzebę analizy przepływu wody w siedliskach związanej z przepływem turbulentnym (Cardinale i in., 2002; Harvey i Clifford, 2009). Turbulencja przepływu wynika z pulsacji prędkości, która wpływa pośrednio i bezpośrednio na różne procesy ekologiczne: rozwój flory dennej (Cardinale i in., 2002), rozdział zasobów pokarmowych, reakcje drapieżników (Roy i in., 2010). Ponadto wielkość turbulencji wpływa na procesy życiowe ryb takie jak: zużycie energii podczas poruszania się (Enders i in., 2009; Lupandin, 2005), siedlisko, które wybierają (Smith i in., 2005). Dotychczasowe badania wskazują na zasadność podejmowania prac nad charakterystyką ruchu turbulentnego w siedliskach (Cardinale i in., 2002). Harvey i Clifford (2009) uważają, że parametry opisujące ruch turbulentny mogą być uzupełnieniem dotychczas istniejących klasyfikacji. Smith i Brannon (2007) sugerują, że intensywność turbulencji może okazać się przydatna do opisu siedlisk ponieważ jednostki hydromorfologiczne często nie różnią się pod względem uśrednionych parametrów, a mogą się różnić pod względem parametrów ruchu turbulentnego. Do tej pory w pracach nad rozróżnianiem siedlisk pod względem parametrów turbulencji udało się wydzielić trzy jednostki – płoso, nurt i bystrze (Hawryło i in. 2013).

Niniejszy artykuł podejmuje próbę analizy wielkości turbulencji w czterech podstawowych jednostkach hydromorfologicznych rzeki górskiej (płoso, nurt, bystrze, rwący nurt) na przykładzie odcinka Skawy.

MATERIAŁ I METODY

Do badań wielkości turbulencji w naturalnej rzece górskiej wybrano odcinek Skawy w okolicach Wadowic (km 20+00 do 21+00). Skawa jest prawym dopływem Wisły o długości 97 km i powierzchni zlewni 1180 km², rzeka ta była do niedawna jedynym tego rzędu ciekim o górskim charakterze bez zbiorni-

ka zaporowego. Obszar dorzecza leży w środkowej części Beskidu Wysokiego, Beskidu Średniego i na Podgórzu Lanckorońskim, przy ujściu jest częścią Doliny Nadwiślańskiej. Wodowskaz w Wadowicach zamyka zlewnię o powierzchni 941 km², przepływ SSQ wynosi 12,7 m³·s⁻¹. Spadek cieku na tej części rzeki wynosi 2,3‰. Pomiary zostały wykonane przy natężeniu przepływu $Q=5,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, gdzie szerokość koryta wypełnionego wodą wynosiła ok. 25 m.

Zróżnicowanie morfologiczne koryta rzeki uwzględniono wyróżniając cztery jednostki hydromorfologiczne występujące na rzece typu górskiego. Jednostki hydromorfologiczne zostały zlokalizowane na podstawie opisu morfologii i charakteru przepływu w tym zachowania zwierciadła wody (Bisson in., 1996, Parasiewicz, 2007) (rysunek1):

- plosło – odcinek o dużym napełnieniu, i spokojnym przepływie wody,
- nurt – odcinek o dobrze wykształconej linii nurtu z dnem płaskim przechodzące do spadku ujemnego,
- bystrze – płytki odcinek o znacznym spadku i widocznej turbulencji na zwierciadle wody,
- rwący nurt – forma morfologiczna o jednostajnym szybkim przepływie wody, dużym spadku i turbulencji na zwierciadle wody.

Za pomocą GPS RTK określono powierzchnię jaką jednostka zajmuje w korycie rzeki oraz spadek zwierciadła wody (spadek geometryczny) w obrębie każdej jednostki (tabela1). Określono również wizualnie przeważającą frakcję rumowiska dennego. W każdej opisanej jednostce hydromorfologicznej wykonano pomiary prędkości chwilowych sondą MicroADV (akustyczny jednopunktowy prędkościomierz dopplerowski), które polegają na zebraniu ciągu odczytów trzech składowych prędkości chwilowej (v_x – w kierunku nurtu, v_y – poprzecznie do nurtu i v_z – w kierunku pionowym) z komórki pomiarowej znajdującej się w odległości 5 cm od czoła sondy.

Pomiary prędkości przeprowadzono w ośmiu, losowo wybranych pionach hydrometrycznych każdej jednostki, na dwóch głębokościach względnych: 0,2h i 0,4h (h – napełnienie w pionie hydrometrycznym). Poziom dna jest w tych badaniach charakterystyką lokalną, wysokości pomiarów określano zgodnie z odczytami sondy w danym pionie hydrometrycznym. Głębokość 0,2h wybrano jako reprezentatywną dla strefy przydennej, która najczęściej uznawana jest za warstwę do 0,3h od dna (Sukhodolov i in., 1998), panują tam odmienne warunki przepływu niż w pozostałej części profilu. W badaniach intensywności turbulencji koryt zwirowych wykonuje się często pomiary na głębokości 0,4h (David i in., 2013; Wilcox i Wohl, 2007). Jest to poziom na którym najczęściej występuje prędkość zbliżona do prędkości średniej w całym profilu (Holmes, 2001; Nelson i in., 2007). Aby możliwa była analiza parametrów ruchu turbulentnego pomiar w każdym punkcie był wykonywany z częstotliwością 20 Hz w czasie 1 minuty. Takie założenia pomiaru są stosowane i rekomendowane przez wielu autorów (Nikora i in. 2003, Buffin-Belanger i Roy, 2005, Książek i in. 2011),

którzy prowadzili badania nad ustaleniem minimalnego czasu pomiaru i minimalnej częstotliwości w pomiarach prędkości chwilowych do analizy turbulencji w korytach żwirowennych.



Rysunek 1. Jednostki hydromorfologiczne, na których zostały przeprowadzone badania (a-płoso, b-nurt, – c-bystrze, d – rwący nurt)

Figure 1. Hydromorphological units where the research were made (a-pool, b-run, c-riffle, d-rapid)

Przed przystąpieniem do obliczeń uzyskane odczyty prędkości chwilowych (ok.1200 w każdym punkcie pomiarowym) przeanalizowano pod względem jakości sygnału. Zastosowanie urządzeń pomiarowych z użyciem efektu Dopplera wymaga usunięcia odczytów, w których pomiar był zakłócony przez szum. Siłę sygnału można odczytać w urządzeniu jako stosunek sygnału odbitego do szumu (SNR). Przyjmuje się, że pomiary o $SNR < 5$ nie powinny być używane w analizie. Kolejnym wskaźnikiem jakości danych jest współczynnik korelacji. Korelacja w urządzeniu jest określona jako procent wyemitowanego sygnału do odbitego. Zalecany minimalny poziom współczynnika korelacji to 70%, podobnie jak autorzy zajmujący się tematem turbulencji w laboratoriach. W wysoko turbulentnych przepływach może nie być możliwości uzyskania wy-

sokich korelacji i producent sondy wskazuje użyteczność pomiarów w takich warunkach już przy korelacji 30%. Martin i in. (2002) w badaniach problemów z uzyskaniem wysokiej korelacji w przepływach turbulentnych, wskazują na użyteczność pomiarów przy korelacji >40% i taki poziom przyjęto w tej pracy. W celu usunięcia punktów odstających w ciągu pomiarowym zastosowano metodę fazowo przestrzenną opracowaną przez Goringa i Nikorę (2002) w modyfikacji Wahla (2002).

Wyniki pomiarów posłużyły do obliczeń parametrów ruchu turbulentnego, które charakteryzują wielkość turbulencji przepływu wody – intensywność turbulencji i turbulentna energia kinetyczna oraz prędkości lokalnej uśrednionej w czasie.

TEORIA I OBLICZENIA

Przepływ turbulentny jest to rodzaj ruchu, gdzie charakteryzujące go wielkości fizyczne wykazują zmienność losową w czasie i przestrzeni (Elsner, 1987). Teoria ruchu turbulentnego zakłada, że prędkość chwilowa w każdym z trzech kierunków wynosi:

$$v = v_{sr} + v' \quad (1)$$

gdzie: v_{sr} – prędkość uśredniona w czasie, v' – chwilowa pulsacja prędkości

W tej pracy obliczenia średniej prędkości i intensywności turbulencji wykonano dla wypadkowej wartości prędkości.

Uśredniona w czasie wartość prędkości v_{sr} obliczana jest jako średnia arytmetyczna z całego ciągu pomiarowego

Intensywność turbulencji jest najczęściej używaną charakterystyką turbulencji zarówno w badaniach naukowych jak i zastosowaniach praktycznych, w tej pracy wyrażono ją jako odchylenie standardowe wartości prędkości chwilowych:

$$TI = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - v_{sr})^2} \quad (2)$$

Jedną z wielkości opisujących przepływ turbulentny jest turbulentna energia kinetyczna TKE , jest to średnia energia kinetyczna przypadająca na jednostkę masy płynu w odniesieniu do turbulentnych struktur przepływu. Turbulentna energia kinetyczna powstaje przez ścinanie i rozbudzanie ruchu. W zasadzie ścinanie przekształca średnią energię kinetyczną w turbulencję, ale również jednocześnie wzbudza i kreuje ją jako efekt pracy przeciwko siłom tarcia (Mazurczyk, 2007 za Sawicki, 2003). Fizycznie turbulentna energia kinetyczna jest charakteryzowana przez odchylenia standardowe fluktuacji prędkości i wyznacza się ją wg wzoru (Nezu i Nakawaga, 1993):

$$TKE = 0,5(\overline{v_x'^2} + \overline{v_y'^2} + \overline{v_z'^2}) \quad (3)$$

Wielkość turbulencji została w tej przedstawiona poprzez obliczenie intensywności turbulencji (równanie 2) i turbulentnej energii kinetycznej (równanie 3).

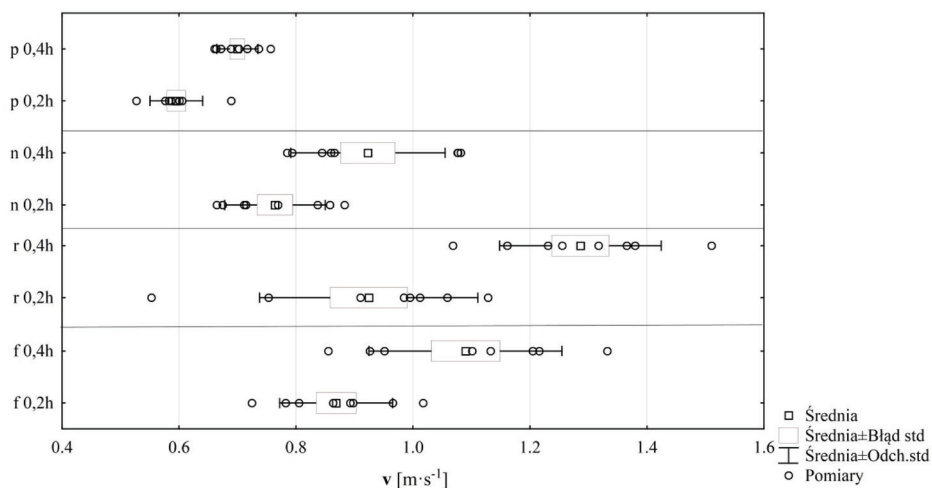
WYNIKI I DYSKUSJA

Przeprowadzone pomiary terenowe oraz obliczenia parametrów ruchu turbulentnego pozwalają na analizę wielkości turbulencji w czterech jednostkach hydromorfologicznych. W tabeli 1 zebrano ogólne charakterystyki jednostek, w których wykonano pomiary prędkości. Płoso charakteryzuje się największą głębokością i najniższym spadkiem dna spośród badanych jednostek, stąd również prędkości lokalne zgodnie z oczekiwaniami przyjmują najniższe wartości (rysunek 2). W nurcie o głębokości średnio powyżej 0,5 m spadek zwierciadła wody miał wartość 3,6‰, prędkość lokalna w dwóch punktach przekraczała 1 m·s⁻¹. Bystrze i rwący nurt są to jednostki wysokiej energii i tak spadek zwierciadła wody wynosił kolejno 9,5‰ i 6,6‰, główna frakcja uziarnienia dna w tych strukturach to ziarna odpowiednio 63-130mm i 130-200mm. W bystrzu głębokość jest niewielka i prędkość lokalna przyjmuje największe wartości spośród badanych jednostek (na poziomie 0,4h powyżej 1,2 m·s⁻¹ – rysunek 2). Jednak najwyższej prędkości spodziewano się w rwącym nurcie, gdzie przepływ jest skoncentrowany na wąskim przekroju, z badań wynika, że prędkość jest niższa niż na bystrzach. W każdej jednostce prędkość na głębokości 0,2h jest niższa niż na 0,4h, co jest oczywistym efektem oddziaływania szorstkości dna.

Tabela 1. Charakterystyka jednostek hydromorfologicznych
(średnia±odchylenie standardowe)

Table 1. Characteristics of hydromorphological units (mean ± standard deviation)

Jednostka	płoso	nurt	bystrze	rwący nurt
średnia głębokość (n=8)	1,05±0,14 m	0,52±0,11 m	0,39±0,06 m	47±0,07 m
spadek zwierciadła wody	0,3‰	3,6‰	9,5‰	6,6‰
powierzchnia w korycie ciek	160 m ²	300 m ²	620 m ²	100 m ²
przeważająca frakcja rumowiska dennego	20-63mm	20-63mm	63-130mm	130-200 mm

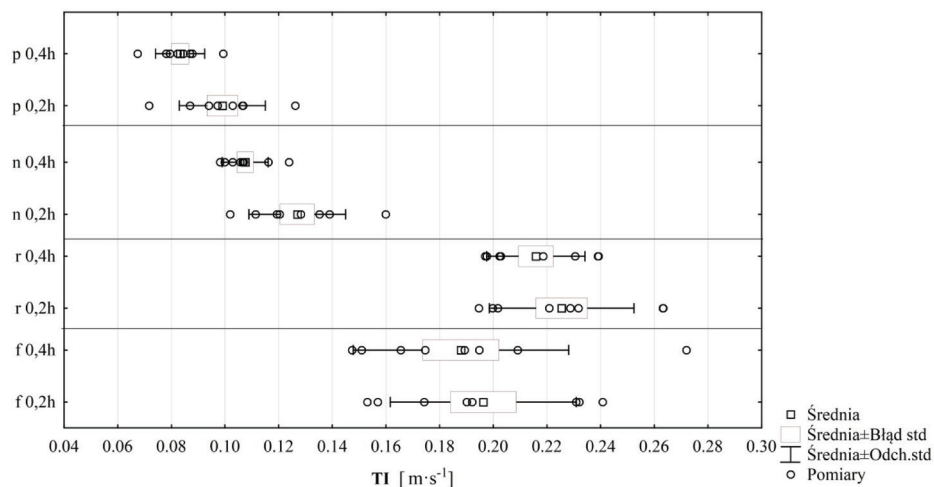


Rysunek 2. Wartości prędkości lokalnych uzyskane w poszczególnych punktach pomiarowych (p-płoso, n-nurt, r-bystrze, f-rwący nurt)

Figure 2. Local velocity values in the individual measurement points (p-pool, n-run, r-riffle, f-rapid)

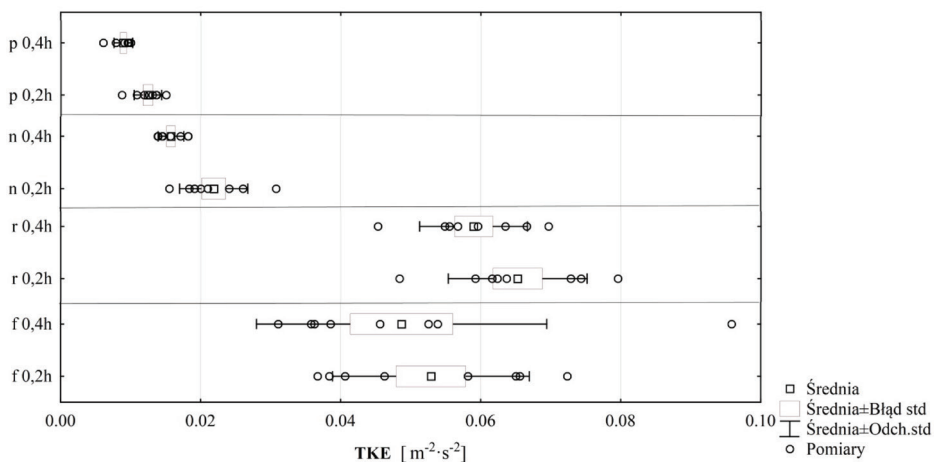
W jednostkach o mniejszej energii przepływu – płoso i bystrze wielkość intensywności turbulencji wykazuje tendencję wzrostu w kierunku dna, we wszystkich jednostkach zauważalny jest wzrost intensywności turbulencji między jednostkami ze zwiększającą się prędkością lokalną (rysunek 3). Turbulencję wzrastającą w kierunku dna Tritico (2009) podaje jako powszechne zjawisko w rzekach górskich. Spowodowane jest to wpływem szorstkości dna na zmniejszenie prędkości średniej a zarazem wzrost intensywności turbulencji. Taką tendencję uzyskano w badaniach struktury przepływu turbulentnego na rzece żwirowej o prędkościach od $0,3$ do $0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, gdzie intensywność turbulencji wynosiła od $0,05$ do $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Roy i in., 2004). Podobny rozkład intensywności turbulencji otrzymano również na rzece o dnie piaszczystym przy prędkościach ok. $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i napętnieniu około 1 m (Nikora i in., 2002). Zatem stwierdzić można, że w warstwie przydennej prędkość charakteryzuje się mniejszymi wartościami prędkości średniej i dużymi pulsacjami. Średnio pulsacje prędkości (intensywność turbulencji) wynoszą w płosach i bystrzach od $0,05$ do $0,015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ co stanowi ok. 15% prędkości uśrednionej w czasie natomiast w bystrzach i rwących nurtach średnio od $0,18$ do $0,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ gdzie wartości te stanowią ok. 17% na głębokości $0,2 \text{ h}$ i ok. 20% prędkości uśrednionej w czasie na głębokości $0,4 \text{ h}$. Omawiana praca charakteryzuje wielkość turbulencji w różnych jednostkach hydromorfologicznych dzięki czemu zauważyć można, że w bystrzu i rwą-

cym nurcie pomimo różnicy prędkości między strefą 0,2h i 0,4h intensywność turbulencji występuje w podobnym zakresie na obu jednostkach.



Rysunek 3. Wartości intensywności turbulencji w poszczególnych lokalizacjach pomiarowych (p-płoso, n-nurt, r-bystrze, f-rwący nurt)

Figure 3. Turbulence intensity values in the individual localizations (p-pool, n-run, r-riffle, f-rapid)



Rysunek 4. Wielkość turbulentnej energii kinetycznej w poszczególnych lokalizacjach pomiarowych (p-płoso, n-nurt, r-bystrze, f-rwący nurt)

Figure 4. Turbulence kinetic energy values in the individual localizations (p-pool, n-run, r-riffle, f-rapid)

Turbulentna energia kinetyczna odzwierciedla pulsacje prędkości w kierunkach x , y i z . Rozkład tej charakterystyki ruchu turbulentnego jest zbliżony do rozkładu intensywności turbulencji (rysunek 4). Zauważalny jest wzrost wartości tego parametru ze zwiększającą się prędkością lokalną oraz zwiększanie się turbulencji w kierunku dna w plosach i nurtach. Turbulentna energia kinetyczna podobnie jak intensywność turbulencji nie odzwierciedla wyraźnie takiej tendencji na bystrzach i rwących nurtach.

W analizie zarówno prędkości jak i intensywności turbulencji oraz turbulentnej energii kinetycznej zauważalny jest duży rozrzut wartości lokalnych, co wskazuje na trudności z jednoznacznym określeniem wielkości turbulencji w poszczególnych jednostkach. Turbulencja w jednostkach hydromorfologicznych związanych z naturalnymi siedliskami organizmów w ekosystemach rzecznych jest zjawiskiem, które wymaga zgłębienia poprzez kontynuowanie badań w tym zakresie na większej ilości jednostek tego samego typu szczególnie w przypadku bystrzy i rwących nurtów.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania wielkości turbulencji w czterech jednostkach hydromorfologicznych tj. w plosie, nurcie, bystrzu i rwącym nurcie rzeki górskiej pozwalają stwierdzić, że:

- wielkość turbulencji jest bardzo zróżnicowana wewnątrz poszczególnych jednostek hydromorfologicznych, lokalne wartości znacznie się różnią,
- intensywność turbulencji zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości pomiędzy jednostkami i rośnie kolejno od plosa przez nurt i rwący nurt do bystrza, gdzie zarówno prędkość jak i wielkości charakteryzujące ruch turbulentny (intensywność turbulencji i turbulentna energia kinetyczna) przyjmują największe wartości,
- turbulencja wyraźnie rośnie w kierunku dna w jednostkach o mniejszej prędkości przepływu (płoso i nurt), natomiast w jednostkach hydromorfologicznych o dużej prędkości przepływu (bystrza i rwące nurty) tendencja taka nie jest jednoznacznie zauważalna.

LITERATURA

Bisson, P., Montgomery, D., Buffington, J. (1996). Valley segments, stream reaches, and channel units. W: Richard, H., Gary, L. (red.), *Methods in Stream Ecology*. Elsevier, London, s. 23–50.

Buffin-Bélanger, T., Roy, A.G. (2005). *1 Min in the Life of a River: Selecting the Optimal Record Length for the Measurement of Turbulence in Fluvial Boundary Layers*. *Geomorphology* 68: 77–94.

Cardinale, B., Palmer, M., Swan, C. (2002). *The influence of substrate heterogeneity on biofilm metabolism in a stream ecosystem*. Ecology 83: 412–422.

Clifford, N.J., Harmar, O.P., Harvey, G., Petts, G.E. (2006). *Physical habitat, eco-hydraulics and river design: a review and re-evaluation of some popular concepts and methods*. Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst. 16: 389–408.

David, G.C.L., Legleiter, C.J., Wohl, E., Yochum, S.E. (2013). *Characterizing spatial variability in velocity and turbulence intensity using 3-D acoustic Doppler velocimeter data in a plane-bed reach of East St. Louis Creek, Colorado, USA*. Geomorphology 183: 28–44.

Elsner, J.W. (1987). *Turbulencja przepływów*. PWN, Warszawa, s. 2–30.

Enders, E.C., Roy, M.L., Ovidio, M., Hallot, É.J. (2009). *Habitat Choice by Atlantic Salmon Parr in Relation to Turbulence at a Reach Scale*. North Am. J. Fish. Manag. 29: 1819–1830.

Goring, D., Nikora, V. (2002). *Despiking acoustic Doppler velocimeter data*. J. Hydraul. Eng. 128: 117–126.

Harper, D., Everard, M. (1998). *Why should the habitat – level approach underpin holistic river survey and management ?* Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst. 413: 395–413.

Harvey, G.L., Clifford, N.J. (2009). *Experimental field assessment of suspended sediment pathways for characterizing hydraulic habitat*. Earth Surf. Process. Landforms 35: 600–610.

Hawryło, A., Książek, L., Leja, M. (2013). *Intensywność turbulencji w różnych jednostkach morfologicznych na przykładzie rzeki Skawy*. W: Traczewska, T. (red.), *Interdyscyplinarne Zagadnienia w Inżynierii i Ochronie Środowiska*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, s. 195–202.

Holmes, R.R. (2001). *Surface Water Data Collection*. W: Harris, M. (red.), *Field Methods For Hydrologic and Environmental Studies*, s. 1–77.

Jowett, I.G. (1993). *A method for objectively identifying pool, run, and riffle habitats from physical measurements*. New Zeal. J. Mar. Freshw. Res. 27: 241–248.

Książek, L., Bartnik, W. (2009). *Wykorzystanie warunków hydraulicznych do oceny typów siedlisk w korycie rzeczonym*. Nauk. Przyr. Technol. dział Melior. i Inżynieria Środowiska 3: 1–8.

Książek, L., Bartnik, W., Rumian, J., Zagórowski, P. (2011). *Turbulent water flow over rough bed – part I*. Journal of Physics: Conference Series 318. IOP Publishing, s. 1–6.

Kownacki, A., Soszka, H. (2004). *Wytyczne do oceny stanu rzek na podstawie makrobezkręgowców oraz do pobierania prób makrobezkręgowców w jeziorach*. Zakład Zoologii Systematycznej UAM, dokument [www \(http://www.zzs.amu.edu.pl/\)](http://www.zzs.amu.edu.pl/) dostęp: 15.02.2015.

Lupandin, A.I. (2005). *Effect of flow turbulence on swimming speed of fish*. Izv. Akad. Nauk Ser. Biol. 32: 558–65.

Maddock, I. (1999). *The importance of physical habitat assessment for evaluating river health*. Freshw. Biol. 41: 373–391.

Martin, V., Fisher, T., Millar, R., and Quick, M. (2002). ADV Data Analysis for Turbulent Flows: Low Correlation Problem (ASCE). W: Vermeyen, T.L.W.C.A.P.K.A.O. and T.B. (red.), *Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002*. American Society of Civil Engineers, Estes Park, Colorado, United States, s. 1–10.

Mouton, a. M., De Baets, B., Goethals, P.L.M. (2009). *Knowledge-based versus data-driven fuzzy habitat suitability models for river management*. Environ. Model. Softw. 24: 982–993.

Nelson, J.M., Wright, C.W., Burman, A.R., Kinzel, P.J. (2007). *Evaluation of an Experimental LiDAR for Surveying a Shallow, Braided, Sand-Bedded River*. University of Nebraska – Lincoln.

Nezu, I., Nakawaga, I. (1993). *Turbulence in Open-channel Flows*. IAHR Monograph Series, Balkema, Rotterdam, s. 1-281

Nikora, V., Aberle, J., Biggs, B. (2003). *Effects of fish size, time to fatigue and turbulence on swimming performance: a case study of Galaxias maculatus*. J. Fish Biol. 63: 1365–1382.

Nikora, V., Green, M.O., Thrush, S.F., Hume, T.M., Goring, D. (2002). *Structure of the internal boundary layer over a patch of pinnid bivalves (Atrina zelandica) in an estuary*. J. Mar. Res. 60: 121–150.

Parasiewicz, P. (2007). *The MESOHABSIM model revisited*. River Res. Appl. 23: 893–903.

Roy, A.G., Buffin-Blanger, T., Lamarre, H., Kirkbride, A.D. (2004). *Size, shape and dynamics of large-scale turbulent flow structures in a gravel-bed river*. J. Fluid Mech. 500: 1–27.

Roy, M., Roy, A., Legendre, P. (2010). *The relations between “standard” fluvial habitat variables and turbulent flow at multiple scales in morphological units of a gravel – bed river*. River Res. Appl. 26, s. 439–455.

Sawicki, J.M. (2003). *Migracja zanieczyszczeń*. Wydawnictwo PG, Gdańsk.

Smith, D.L., Brannon, E.L. (2007). *Influence of cover on mean column hydraulic characteristics in small pool riffle morphology streams*. River Res. Appl. 23, s. 125–139.
Smith, D.L., Brannon, E.L., Odeh, M., (2005). *Response of Juvenile Rainbow Trout to Turbulence Produced by Prismatic Shapes*. Trans. Am. Fish. Soc. 134, s. 741–753.

Sukhodolov, A., Thiele, M., Bungartz, H. (1998). *Turbulence structure in a river reach with sand bed*. Water Resour. Res. 34: 1317–1334.

Tritico, H.M. (2009). *The effects of turbulence on habitat selection and swimming kinematics of fishes*. Rozprawa doktorska, University of Michigan, s. 10-45.

Wahl, T.L. (2002). *Discussion of “‘Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data’” by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora*. J. Hydraul. Eng. 128: 484–488.

Wilcox, A.C., Wohl, E.E. (2007). *Field measurements of three-dimensional hydraulics in a step-pool channel*. Geomorphology 83: 215–231.

dr inż. Agnieszka Woś
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie
Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
awos@ur.krakow.pl
507 558 243

Wpłynęło: 18.04.2016

Akceptowano do druku: 03.06.2016