

ZYGMUNT MĘYNARCZYK, MARCIN SŁOWIK

ZMIANY ROZKŁADU PRĘDKOŚCI WODY W KORYCIE RZECZNYM NA PRZYKŁADZIE DOLNEGO ODCINKA OBRY

ZARYS TREŚCI

Wartość przepływu wody w korycie rzeczonym można określić za pomocą pomiaru bezpośredniego. Jednak metody te nie umożliwiają określenia prędkości przepływu dla dowolnie wybranego punktu w przekroju pomiarowym. W pracy zastosowano metodę funkcji spline, umożliwiającą modelowanie wyników pomiarów prędkości przepływu. Model ten umożliwił obliczenie wartości przepływu całkowitego oraz przedstawienie wartości prędkości w przekroju poprzecznym za pomocą izotach. Tego rodzaju prezentację umożliwił program RZEKA.

Model aproksymacji funkcji spline zastosowano do obliczeń i przedstawienia rozkładu prędkości w przekrojach poprzecznych koryta Obry, w dolnym odcinku rzeki w okolicach Międzyrzecza. Prezentowana metoda umożliwiła szczegółową analizę zmian prędkości przepływu wody przy różnych stanach wody w korycie rzeczonym. Zastosowany model pozwolił na określenie zmian w usytuowaniu strefy maksymalnych prędkości przepływu w poszczególnych przekrojach pomiarowych. Przyczyną takich różnic był asymetryczny kształt koryta w przekrojach założonych na zakolu meandrowym. Przeprowadzono także analizę zmian zasięgu strefy nurtu oraz analizę zmian prędkości przepływu w strefie przydennej koryta dla wysokich i niskich stanów wody.

WSTĘP

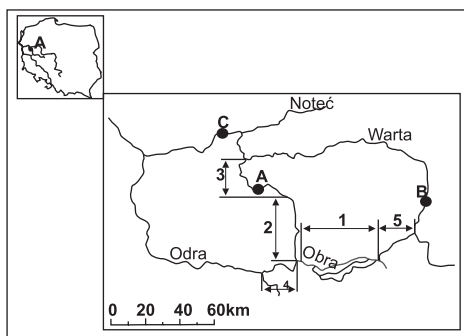
Rzeka Obra, lewobrzeżny dopływ Warty, przepływa przez środkową i zachodnią część Niziny Wielkopolskiej, wykorzystując na blisko jednej trzeciej swej długości fragment Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej. Jest to największy ciek wodny między Wartą a Odrą. Koryto Obry od początku XIX w. podlegało intensywnym pracom hydrotechnicznym. Budowano tu systemy kanałów, głównie w górnym odcinku rzeki (płynącym na obszarze Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej rys. 1; odcinek 1) oraz urządzenia piętrzące. Ponadto wykonano prace regulacyjne polegające na „prostowaniu” koryta rzecznego, w wyniku których dokonano odcięcia zakoli rzecznych (rys. 1, odcinek 3). W dolnym biegu rzeki (odcinek 3; rys. 1)

wzniesiona została zapora wodna w Bledzewie, gdzie powstał zbiornik wodny.

Oprócz zmian wprowadzanych przez człowieka, specyficzną cechą reżimu Obry jest występowanie jezior przepływowych, które wpływają na złagodzenie amplitudy stanów wody, przepływów oraz przebiegu wezbrań (PAŚLAWSKI 1973; CHOIŃSKI 1988; BYCZKOWSKI 1999; BAJKIEWICZ-GRABOWSKA 2002). Badania nad zmianami przepływu w korycie rzeczonym przeprowadzono w dolnym odcinku rzeki Obry, w okolicach Międzyrzecza. Jest to odcinek meandrowy, na którym prace hydrotechniczne były ograniczone i w zasadzie bezpośrednio nie zmieniły układu geometrii koryta rzecznego. Ponadto jest to jedna z niewielu rzek niżowych, przepływających przez kilka jezior.

POŁOŻENIE GEOGRAFICZNE I PRZEBIEG DOLINY OBRY

Źródła Obry znajdują się na wysokości 145 m n.p.m. w odległości około 2,5 km od wsi Obra Stara, na południe od Jarocina. W okolicach tego miasta rzeka ma ujście do Lutyni, powstałe w wyniku budowy kanału. W dalszej swojej części Obra wykorzystuje przebiegającą równoleżnikowo Pradolinę Żerkowsko-Rydzyską (BARTKOWSKI 1957; KRYGOWSKI 1961). Między Wieszkowem a Kościanem oraz na równoleżnikowym odcinku, przebiegającym przez obszar Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej (rys. 1; odcinek 1), Obra ujęta jest w kanał z systemem śluz i przepustów. Na odcinku 1 (rys. 1) Obra jest rozdzielona na



Rys. 1. Przebieg Obry w jej środkowym i dolnym odcinku (Kościan – Skwierzyna). Poszczególne odcinki wydzielono wg TOMASZEWSKIEGO (1967)

1 – odcinek Kościan – Kargowa (Pradolina Warszawsko-Berlińska), 2 – odcinek Kargowa – Policko, 3 – odcinek Policko – Skwierzyna, 4 – bifurkacja Obry (ujście do Odry koło Cigacice), 5 – ujście do Warty (Kanał Mosiński)

Fig. 1. The Obra river in its middle and lower course (Kościan-Skwierzyna). Particular sections were distinguished according to TOMASZEWSKI (1967)

1 – section Kościan – Kargowa (Warsaw-Berlin Pradolina), 2 – section Kargowa – Policko, 3 – section Policko – Skwierzyna, 4 – bifurcation of the Obra river (outlet to Odra near Cigacice), 5 – outlet to Warta (Mosiński channel)

trzy kanały: północny, środkowy i południowy. W okolicach Mosiny znajduje się ujście do Warty (Kanał Mosiński) (rys. 1; odcinek 5). Natomiast naturalne ujścia do Odry znajdują się w Pradolinie Warszawsko-Berlińskiej koło miejscowości Cigacice (do Odry) (rys. 1; odcinek 4) oraz koło Skwierzyny (do Warty).

W okolicach Chwalimia Obra skręca w kierunku północnym i płynie przez rozległą równinę sandrową, określaną jako Sandr Nowotomyski (odcinek nr 2; rys. 1). Powierzchnia sandru jest nachylona ku południowi. Obra jako jedyna rzeka na tym obszarze płynie w kierunku przeciwnym do nachylenia powierzchni sandrowej – z południa na północ (TOMASZEWSKI 1967). Na omawianym odcinku występują jeziora przepływowe (Jezioro Chobienickie, Grójeckie, Nowowiejskie, Zbąszyńskie, Lutol, Młyńskie, Wielkie).

W dalszym swoim biegu, na odcinku między Rybojadami a Polickiem, rzeka Obra charakteryzuje się przebiegiem zbliżonym do prostoliniowego. Szerokość doliny wynosi tu około 200-250 m. Taki układ koryta rzeczno jest efektem prac hydrotechnicznych. Zmiany te ilustrują mapy z lat 1895 i 1934.

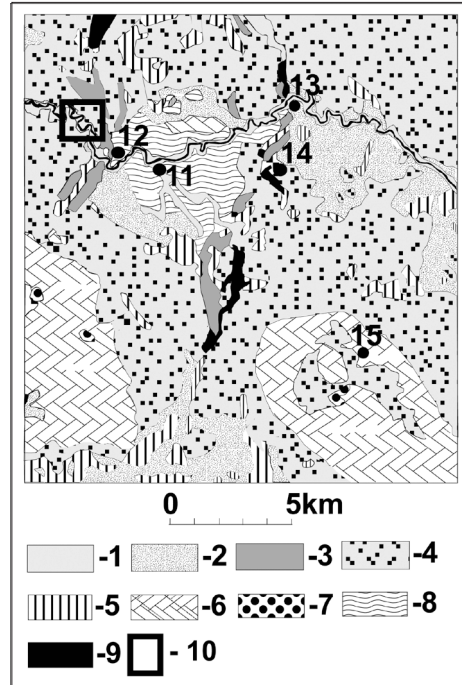
OBSZAR BADAŃ

Pomiary hydrologiczne przeprowadzono w dolnym odcinku Obry, znajdującym się na obszarze Obniżenia Obry (odcinek rzeki od Policka do ujścia w Skwierzynie; rys. 1). Jest to wklęsła forma terenu przebiegająca w kierunku NW – SE, co nawiązuje do podplejstocenińskiego obniżenia sprzed ostatniego zlodowacenia (KOWALSKA 1960). Obniżenie Obry tworzą trzy baseny zastoiskowe: Policki, Międzyrzecki i Gorzycki, zbudowane z ilów, mułków i piasków bardzo drobnoziarnistych (BARTKOWSKI

1956). Obszerna charakterystyka dotycząca budowy geologicznej, geomorfologii i stosunków wodnych tego obszaru przedstawiona jest w opracowaniu pod redakcją M. Żurawskiego (CHOIŃSKI i in. 1979). Na obszarze Obniżenia Obry rzeka meandruje. Śladami występowania tego procesu również w przeszłości są odcięte zakola (w okolicach Żółtwin) i paleomeandry. Największe z nich znajdują się między Żółtwinem a Międzyrzeczem oraz między Św. Wojciechem a Gorzycą.

Do badań wybrano odcinek doliny rzeki Obry o długości 1000 m i szerokości wahającej się od 70 do 150 m, położony około 3 km na północny zachód od Międzyrzecza, w pobliżu miejscowości Św. Wojciech. W tym miejscu koryto Obry charakteryzuje się dobrze wykształconymi zakolami meandrowymi (rys. 3). Dolina jest tu wąska i głęboka – brzegi erozyjne zakoli meandrowych cechuje znaczne nachylenie stoków i duża wysokość, która waha się od 7 do 10 m nad poziomem dna doliny. Obra wykształciła swoją dolinę w osadach polodowcowych reprezentowanych przez glinę morenową i fluwioglacjalne piaski drobnoziarniste, widoczne w kilku odsłonięciach występujących w brzegach wklęsłych zakoli meandrowych. Gлина morenowa stanowi również podłoże osadów aluwialnych, występujących w dnie doliny Obry.

Wysoczyzna morenowa otaczająca dolinę Obry charakteryzuje się niewielkimi wzniesieniami. W bezpośrednim sąsiedztwie badanego odcinka doliny znajduje się ona na wysokości 51–52,5 m n.p.m. Na północny wschód od omawianego terenu położona jest forma wypukła, o wysokości około 88 m n.p.m.. Inne wyraźne wzniesienie, położone w pobliżu obszaru badań, to Oz Wojciechowski (rys. 3). Charakteryzuje się on



Rys. 2. Mapa geologiczna utworów powierzchniowych. Arkusz Świebodzin. Redaktor mapy: MOJSKI (1976), opracowanie: WINNICKI (1977)

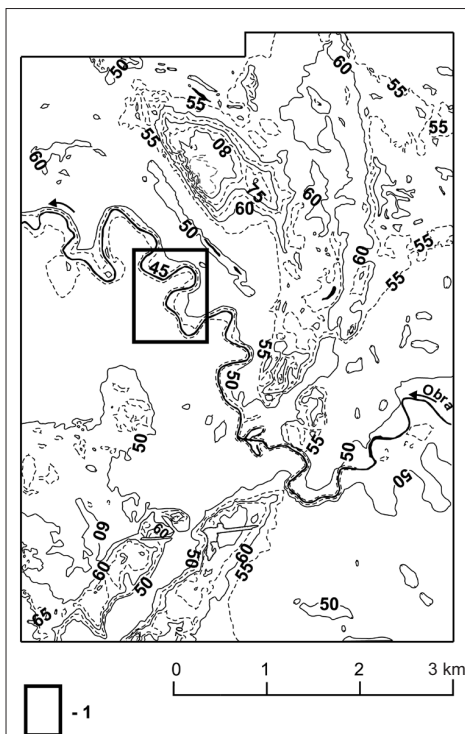
1 – piaski, mułki i żwiry rzeczne (holocen), 2 – piaski, mułki i żwiry rzeczne (zlod. północnopolskie, faza pomorska), 3 – piaski i żwiry ozów, 4 – piaski i żwiry wodnolodowcowe (zlod. północnopolskie, faza poznańsko-dobrzyńska), 5 – torfy (holocen), 6 – glina zwałowa lub jej rezidua, 7 – piaski, żwiry i głązy moren czołowych, 8 – mułki, piaski i ropy jeziorne, 9 – rzeki i jeziora, 10 – obszar badań. Główne miejscowości: 11 – Międzyrzecz, 12 – Św. Wojciech, 13 – Żółtwin, 14 – Bobowicko, 15 – Bukowicz

Fig. 2. Surface sediments geologic map.

Localization: Świebodzin

1 – river sands, silts and gravels (Holocene), 2 – river sands, silts and gravels (Pólnocnopolskie glacial period, Pomeranian phase), 3 – sands and gravels in eskers, 4 – fluvioglacial sands and gravels (Pólnocnopolskie glacial period, Poznańsko-dobrzyńska phase), 5 – peats (Holocene), 6 – basal till or its residuum, 7 – sands, gravel and boulders of terminal moraines, 8 – lacustrine silts, sands and loams, 9 – rivers and lakes, 10 – research area. Main towns and villages: 11 – Międzyrzecz, 12 – Św. Wojciech, 13 – Żółtwin, 14 – Bobowicko, 15 – Bukowicz

południkowym przebiegiem i zbudowany jest głównie z osadów fluwioglacjalnych (piaski, żwiry) (BARTKOWSKI 1956).



Rys. 3. Mapa hipsometryczna obszaru badań i jego otoczenia
1 – obszar badań

Fig. 3. Hypsometric map of research area and its neighbourhood
1 – research area

Formie tej towarzyszy podmokłe obniżenie, które może być pozostałością ryny glacialnej (rys. 3).

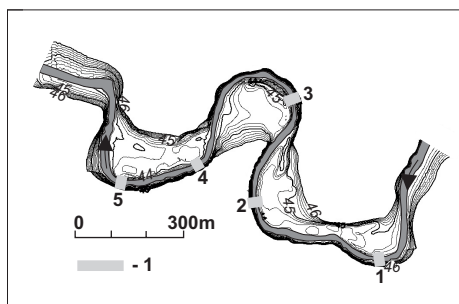
BADANIA TERENOWE

Pomiary hydrologiczne w korycie Obry przeprowadzono w okresie od 2 lutego 2002 r. do 4 kwietnia 2003 r. Wyznaczono pięć przekrojów poprzecznych (rys. 4), na których wykonano pomiary prędkości przepływu w pionach hydrometrycznych, przy zachowaniu między nimi odległości 1 m. Prędkości prze-

pływu mierzono młynkiem hydrometrycznym. Łącznie wykonano 12 serii pomiarowych. Ponadto, w celu przedstawienia geometrii koryta, wykonano zdjęcie tachimetryczne badanego fragmentu doliny Obry w skali 1:3000 (rys. 4).

Według wytycznych PIHM (1970) pomiary prędkości przepływu przy głębokości rzeki przekraczającej 0,6 m przeprowadza się przy dnie, na głębokościach 0,2h, 0,4h i 0,8h (h – głębokość koryta) oraz przy powierzchni. Liczba punktów, w których wykonano pomiary, jest większa od proponowanej w instrukcji PIHM. Zwiększona w stosunku do wymagań liczba pomiarów wynika z przeznaczenia ich do określenia zależności między zmiennymi charakteryzującymi przepływ a natężeniem transportu rumowiska w przekroju koryta rzeczno. Prędkość przepływu mierzono punktowo w każdym pionie – w odległości od dna 0,1, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 m, jak również pod powierzchnią zwierciadła wody. Szczególnie istotne były pomiary przeprowadzone w strefie przydennej koryta.

W każdej z serii pomiarowych odczytywano wysokość stanu wody z łaty wodowskazowej umieszczonej na wo-



Rys. 4. Położenie przekrojów pomiarowych
1 – przekroje pomiarowe

Fig. 4. Location of cross-section profiles
1 – river bed cross-sections

dowskacie IMGW w Międzyrzeczu. Jest on ulokowany w odległości 42,8 km od ujścia Obry w Skwierzynie i zamyka obszar dorzecza Obry o powierzchni 2,116 tys. km². Należy dodać, że systematyczne obserwacje stanów wody zostały zakończone przez IMGW 30 kwietnia 1992 r. Obecnie najbliższymi wodowskazami, na których prowadzone są pomiary są wodowskazy ulokowane w Zbąszyniu i Bledzewie.

METODY POMIARU PRZEPLYWU

Natężenie przepływu w rzece można określić przez pomiary takich parametrów koryta, jak pole powierzchni przekroju poprzecznego i prędkość przepływu. W zależności od rodzaju mierzonego parametru stosuje się metodę objętościową, pomiar za pomocą przelewu, młynkiem hydrometrycznym, łatą hydrometryczną, pływakami oraz metodę chemiczną. Pomiary prędkości służące do obliczenia przepływu prowadzić można w wyznaczonych punktach za pomocą różnego typu przyrządów (MAJEWSKI 1975; UJDA 1985; BYCZKOWSKI, WICHER 1985; LEBIECKI, CZERNUSZENKO 1987; BAJKIEWICZ-GRABOWSKA i in. 1993; BYCZKOWSKI 1996; OZGA-ZIELIŃSKA, BRZEZIŃSKI 1997).

Inny sposób pomiaru przepływu to metoda akustyczna. Polega ona na obliczeniu czasu, w jakim rozchodzi się fala dźwiękowa w wodzie na danym odcinku koryta. Zaletą tej metody jest możliwość prowadzenia ciągłych pomiarów natężenia przepływu. Jest ona przydatna w warunkach braku jednoznacznej zależności między stanem wody a natężeniem przepływu. Elektronicznym urządzeniem służącym do tego rodzaju pomiaru jest ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Przez wykorzystanie efektu Dopplera, przyrząd ten

oblicza prędkość przepływu w całym profilu pionowym, w równych przedziałach głębokości (KELLMAN 1998).

Określenia prędkości i natężenia przepływu dokonuje się również za pomocą wzorów hydraulicznych. Metoda ta stosowana jest w sytuacji, gdy konieczne jest wyznaczenie wartości przepływu przy wysokich stanach wody nie objętych pomiarami. Do wyznaczenia prędkości przepływu w przekroju pomiarowym najczęściej stosuje się wzór Chezy:

$$v_m = C\sqrt{RI}$$

gdzie: v_m – średnia prędkość przepływu, C – współczynnik prędkości, R – promień hydrauliczny (stosunek długości przekroju do obwodu zwilżonego koryta), I – spadek zwierciadła wody.

W przypadku gdy istnieją wcześniejsze pomiary natężenia przepływu, można na ich podstawie określić wartość współczynnika prędkości C :

$$C = \frac{v_m}{\sqrt{h_m I}}$$

gdzie: v_m – średnia prędkość w przekroju zmierzona np. młynkiem hydrometrycznym, h_m – średnia głębokość przekroju, I – spadek zwierciadła wody.

W przypadku braku wcześniejszych pomiarów wartość współczynnika C otrzymuje się ze wzoru Manninga:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$$

gdzie: n – współczynnik szorstkości, R – promień hydrauliczny.

Wartość natężenia przepływu obliczona wyżej przedstawioną metodą jest obciążona wieloma błędami, które wynikają z przyjętych uproszczeń (wzór Chezy dotyczy równomiernego ruchu wody, w którym hydrauliczne parametry koryta nie zmieniają się wraz z długością koryta). Wzory te służą do obli-

czenia przepływu w warunkach, w których wykonanie pomiarów w korycie rzeczonym jest niemożliwe (np. przy intensywnych wezbraniach powodziowych). Wówczas punktem odniesienia mogą być ślady wysokiej wody zaznaczone na drzewach lub innych punktach w pobliżu koryta. Obliczone za pomocą wzorów hydraulicznych wartości przepływu można porównać z wynikami uzyskanymi z bezpośrednich pomiarów w korycie rzeczonym. Stosowane w warunkach terenowych metody bezpośredniego pomiaru nie umożliwiają jednak określenia prędkości przepływu dla dowolnie wybranego punktu w przekroju pomiarowym. Przy dalszym opracowaniu wyników konieczne jest zatem zastosowanie matematycznego modelu. Celem pracy jest przeprowadzenie analizy zmian w rozkładzie prędkości przepływu, w dolnym odcinku rzeki Obrzy, przy wykorzystaniu matematycznego modelu aproksymacji funkcji spline (MŁYNARCZYK 1996; MŁYNARCZYK, REN-KURC 1999).

METODY OPRACOWANIA WYNIKÓW

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów prędkości przepływu możliwe jest wykreślenie tachoidy ilustrującej rozkład prędkości w pionie hydrometrycznym. Tachoida umożliwia z kolei wyznaczenie średniej prędkości przepływu. Natomiast w przypadku wykreślenia izotach, przedstawiających rozkład prędkości przepływu w przekroju, stosowane są różne metody (w tym metoda Culmanna). Natomiast podstawowym sposobem obliczenia wartości przepływu jest metoda rachunkowa.

Do analizy zmian rozkładu prędkości przepływu służą również modele matematyczne. Opierają się one zarówno na wynikach pomiarów terenowych, jak

i na badaniach eksperymentalnych. Przy symulacji przepływu w warunkach laboratoryjnych zastosowano model wykorzystujący zjawisko turbulencji (Reynolds stress transport model) (SHAMS i in. 2002), który zdaniem tych autorów umożliwia uzyskanie rozkładu prędkości przepływu i ciśnienia w przekroju pomiarowym. Model ten stosowany był w warunkach kanału doświadczalnego z prostokątnym korytem przepływowym. Określenie jego przydatności wymaga przetestowania w warunkach naturalnych.

Do obliczenia przepływu stosowane są również modele ANN, oparte na sieciach neuronowych (ANN – Artificial Neural Network) (LI, ROY 2002). Według autorów zbudowany model sieci neuronowej w swej strukturze odzwierciedla właściwości badanej sieci rzecznej oraz uwzględnia równania ciągłości ruchu wody i transportu materiału.

Do określania zmian wartości przepływu często w ostatnich latach stosuje się modele hydrologiczne „opad-odpływ” (BRATH i in. 2004; KOREN i in. 2004; CROKE i in. 2004). Na podstawie takich danych, jak wielkość opadów atmosferycznych, spływ powierzchniowy, nachylenie stoków i wysokości względne obszaru zlewni, formuły te umożliwiają prognozę zmian przepływu, także dla fragmentów badanej zlewni nie objętych posterunkami pomiarowymi (BRATH i in. 2004). Modele te wykorzystuje się również do przewidywania reakcji zlewni na silną antropopresję, np. wylesianie (KOREN i in. 2004). Modele te mogą być przydatne w prognozowaniu zmian przepływu. Zastrzeżenia budzi ich dokładność. Wyniki bowiem są obciążone wynikami pomiarów zmiennych kształtujących dolinę rzeczną. Dlatego ich przydatność dla określenia zmiany rozkładu prędkości przepływu w korycie rzeczonym jest ograniczona.

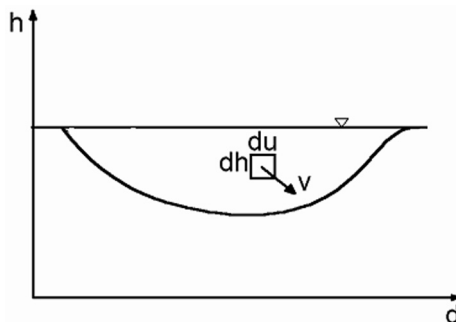
W celu przedstawienia zmian rozkładu prędkości przepływu, występujących w korycie Obry w różnych warunkach hydrologicznych, do opracowania wyników pomiarów zastosowano matematyczny model aproksymacji funkcji spline (MŁYNARCZYK 1996; MŁYNARCZYK, REN-KURC 1999). Model ten umożliwia uzyskanie rozkładu prędkości przepływu w przekroju pomiarowym oraz określenie wartości prędkości w dowolnie wybranym punkcie przekroju.

Matematyczny zapis tej funkcji przyjmuje następującą postać:

$$\varepsilon(u) = \begin{cases} \frac{(-1)^{\frac{k}{2}+1}}{2^{2m-1} \pi^{\frac{k}{2}} (m-1)! (m-k/2)!} \cdot u^{2m-1} \log(u); & k \text{ parzyste} \\ \frac{(-1)^m \Gamma(k/2 - m)}{2^{2m} \pi^{\frac{k}{2}} (m-1)!} \cdot u^{2m-1}; & k \text{ nieparzyste} \end{cases}$$

W obliczeniach zastosowano metodę podziału przekroju koryta, polegającą na całkowaniu n prostokątnych podobszarów $\langle d_i, d_{i+1} \rangle * \langle h_i, h_{i+1} \rangle$ i liczeniu sum $\sum_{i=1}^p \sum_{j=m}^{n_i} v(d_i, h_j) * (d_{i+1} - d_i)(h_{j+1} - h_j)$ (MŁYNARCZYK, REN-KURC 1999). Pojedynczy element powierzchni przekroju (będący efektem całkowania) widoczny jest na rys. 5.

Aproksymacyjna funkcja spline umożliwia obliczenie natężenia przepływu w korycie rzeczonym, ponieważ możliwe jest wyznaczenie wartości numerycznych i opisu analitycznego każdego przekroju powierzchni $v = f(d, h)$, dowolnie wybraną płaszczyzną (MŁYNARCZYK, REN-KURC 1999). Stosując proces przecinania płaszczyznami prostopadłymi do płaszczyzny przekroju poprzecznego



Rys. 5 Element (du, dh) z wektorem prędkości v , w przekroju poprzecznym koryta rzeczowego

Fig. 5. Element (du, dh) with velocity vector v in the channel cross-section

możemy uzyskać prędkości średnie i tachoidy dla dowolnego pionu hydrometrycznego. Model służy również do obliczenia objętości przepływu wody przez wycinek przekroju koryta rzeczowego zawarty między dwoma tachoidami oraz prędkości przepływu dla dowolnie wybranego punktu w przekroju poprzecznym (dotyczy to również prędkości przepływu w strefie dna) (MŁYNARCZYK, REN-KURC 1999).

Obliczenia w ramach przedstawionego modelu przeprowadza się za pomocą programu RZEKA. Na podstawie obliczeń funkcji spline uzyskuje się bryłę rozkładu prędkości w przekroju koryta rzeczowego. Przecięcie tej bryły prostopadłe do przekroju w dowolnie wybranym pionie hydrometrycznym umożliwia wykreślenie tachoid. Podstawę obliczeń stanowi analitycznie wyznaczony przekrój powierzchni przecięty płaszczyzną. Dokonując wyboru opcji z menu programu można wykreślić tachoidy dla dowolnego pionu hydrometrycznego. Dla każdej z nich można obliczyć prędkość średnią, a dla wycinka bryły, ograniczonego dwoma tachoidami, określić przepływ cząstkowy. Przez sumowanie przepływów cząstkowych można obliczyć natężenie prze-

plywu w przekroju koryta rzecznego. Program RZEKA umożliwia również wykreślenie przekroju poprzecznego koryta z izotachami, obliczenie prędkości przepływu dla dowolnie wybranego punktu powierzchni przekroju poprzecznego oraz wyznaczenie wartości promienia hydraulicznego. Parametry rysowania oraz wartości prędkości dla ich kreślenia wybierane są z menu programu.

CHARAKTERYSTYKA HYDROLOGICZNA DOLNEGO ODCINKA OBRZY

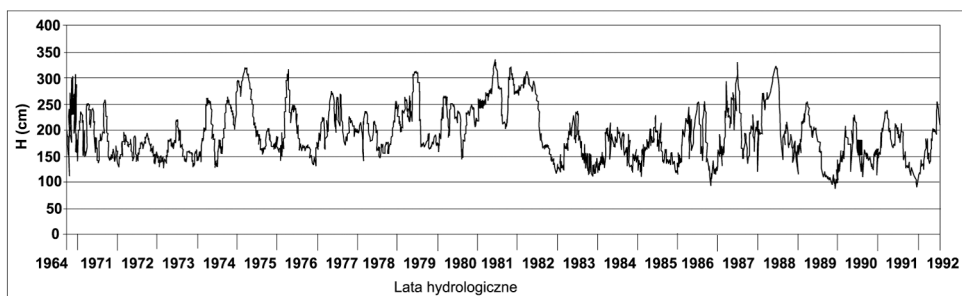
Reżim (ustrój) hydrologiczny rzeki rozumiany jest jako kształtowanie się odpływu pod wpływem środowiska przyrodniczego jej dorzecza. Innymi słowy, jest to reakcja rzeki na klimat w powiązaniu z innymi cechami fizyczno-geograficznymi dorzecza. Reżim odpływu wskazuje rodzaj i strukturę czasową przepływu rzeki w cyklu dobowym, rocznym i miesięcznym (GUTRY-KORYCKA 2001).

Charakterystykę hydrologiczną dolnego odcinka Obrzy oparto na zmienności stanów wody występujących w korycie rzeki Obrzy w przekroju Międzyrzecz, w okresie 1964–1992. Dla okresu późniejszego brakuje danych, w roku 1992 (30 kwietnia) bowiem IMGW zakończył pomiary na tym posterunku. Ponadto na wodowskazie

Międzyrzecz nie prowadzono pomiarów przepływu i nie wykonano krzywej konsumpcyjnej. Najbliższe dwa posterunki, na których prowadzi się takie pomiary znajdują się w Zbąszyniu i Bledzewie. Wyznaczenie związku stanów wody w odniesieniu do tych wodowskazów było niemożliwe ze względu na zabudowę hydrotechniczną (zastawki) i sztucznie wyznaczone stałe piętrzenia w Zbąszyniu przy wypływie Obrzy z Jeziora Zbąszyńskiego oraz ze względu na zapórę wodną w Bledzewie i związane z nią sztuczne piętrzenie wody.

Obrza charakteryzuje się regularnym rytmem wahań stanów wody (rys. 6). W analizowanym wieloleciu wezbrania powodziowe miały miejsce najczęściej w miesiącach zimowych i wczesnowiosennych (luty-kwiecień). Najwyższe zanotowane stany wody przekroczyły 300 cm (maksymalnie 340 cm w marcu 1981; rys. 6). Stany niżówkowe występowały głównie w miesiącach letnich i jesiennych (minimum: 81 cm w październiku 1989; rys. 6). W okresie letnim pojawiały się wezbrania opadowe. Były one jednak krótkotrwałe w porównaniu z wezbraniami okresu wiosennego, często powodowanymi roztopami.

Należy zwrócić uwagę na różnice w częstości występowania określonych stanów wody w latach hydrologicznych



Rys. 6. Zmiany stanów wody w przekroju Międzyrzecz – lata 1964–1992

Fig. 6. Changes of water stages in Międzyrzecz cross-section – years 1964–1992

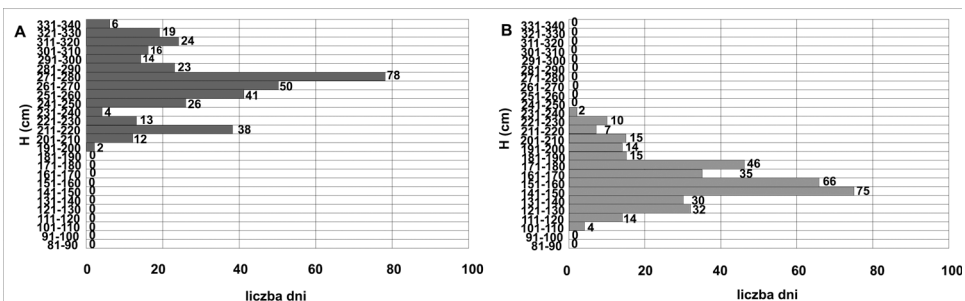
suchych i wilgotnych. Poniżej (rys. 7A i 7B) przedstawiono diagramy ilustrujące liczbę dni z daną wartością stanu wody. W roku wilgotnym stany wody występowały najczęściej w przedziale 271–280 cm (rys. 7A), natomiast w roku suchym – w przedziale 141–150 cm (rys. 7B). Najwyższe zanotowane stany wody w roku 1981 sięgnęły 340 cm (rys. 7A), a w roku 1990 osiągnęły jedynie 240 cm (rys. 7B). Tak znaczne różnice w wartościach stanów wody znalazły swoje odbicie w warunkach przepływu w korycie Obry.

Zasilanie rzeki Obry można zaliczyć do reżimów śnieżno-deszczowych z jednym maksimum i jednym minimum w ciągu roku. Potwierdza to poglądy DYNOWSKIEJ (1971). Zdaniem autorki jest to reżim zaliczany do grupy umiarkowanej z wezbraniem wiosennym oraz gruntowo-deszczowym zasilaniem. Należy jednak zauważyć, że w analizowanym wieloleciu wystąpiły lata, w czasie których wysokie stany wody utrzymywały się przez bardzo długi czas. Przyczyniła się do tego wielkość opadów atmosferycznych, których miesięczne sumy były wysokie nie tylko w miesiącach letnich, lecz także wczesnowiosennych i jesiennych. Przykład tego rodzaju stanowi rok hydrologiczny 1981 (rys. 6). Z kolei w latach suchych można

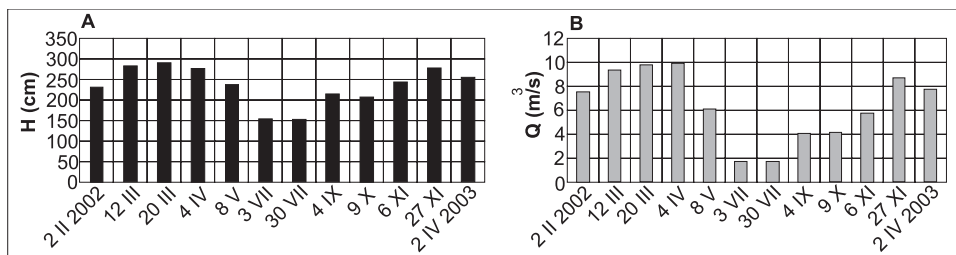
zauważyć znaczne wydłużenie okresów stanów niskich, które oprócz miesięcy trwały nieprzerwanie aż do okresu zimowego (lata 1983, 1984 i 1985; rys. 6). Jako istotny czynnik wpływający na reżim hydrologiczny Obry należy wymienić obecność jezior przepływowych, które wpływają na zmniejszenie amplitudy wahań stanów wody (PASLAWSKI 1973; CHOIŃSKI 1988; BAJKIEWICZ-GRABOWSKA 2002). Wpływ jezior zaznacza się wyrównaniem odpływu przez obniżenie wielkości przepływów kulminacyjnych, rozłożeniem wezbrań w dłuższym okresie oraz podwyższeniem stanów niżówkowych (BYCZKOWSKI 1999).

ZMIENNOŚĆ STANÓW WODY I PRZEPEŁYWÓW W OKRESIE OBJĘTYM POMIARAMI

W okresie objętym pomiarami (od 2 lutego 2002 do 4 kwietnia 2003) najwyższe stany wody zanotowano wiosną (14 III 2002: 284 cm, 21 III: 292 cm i 5 IV: 277 cm; rys. 8A) oraz późną jesienią (27 XI 2002: 278 cm) przy objętości przepływu wynoszącej maksymalnie 10 m³/s (rys. 8B). Natomiast w okresie letnim wystąpiły długotrwałe stany niskie, wynoszące w lipcu i sierpniu 154 cm (rys. 8A) przy objętości przepływu poniżej 2 m³/s (rys. 8B).



Rys. 7. Częstość stanów wody w wybranym roku wilgotnym (1981) i suchym (1990)
Fig. 7. Frequency of water stages in chosen wet (1981) and dry (1990) hydrological year

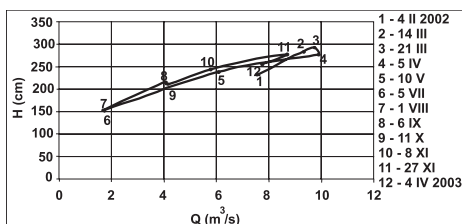


Rys. 8. Zmienność stanów wody i przepływów w okresie objętym badaniami (2 II 2002–4 IV 2003)

Fig. 8. Water stage and discharge changes during field research period (2 II 2002–4 IV 2003)

Największe wezbranie zanotowano w miesiącach wiosennych. Miało ono charakter opadowy. W czasie jego trwania maksymalnym zarejestrowanym stanem wody towarzyszyły największe wartości przepływu (14 III 2002: $9,32 \text{ m}^3/\text{s}$, 21 III: $9,71 \text{ m}^3/\text{s}$ i 5 IV: $9,89 \text{ m}^3/\text{s}$) (rys. 8A, B i rys. 9). Podczas tego wezbrania maksymalny przepływ wystąpił 5 IV 2002. Sytuację tę ilustruje przebieg pętli histerezy krzywej natężenia przepływu (rys. 9).

Podczas prowadzonych pomiarów zwrócono także uwagę na zmiany prędkości przepływu w przekroju poprzecznym koryta Obry. Rozkład prędkości przepływu zaprezentowano dla stanów niskich (lipiec 2002: 154 cm), średnich (październik 2002: 208 cm) i wysokich (kwiecień 2003: 256 cm) w odniesieniu do trzech wybranych przekrojów poprzecznych (rys. 10).

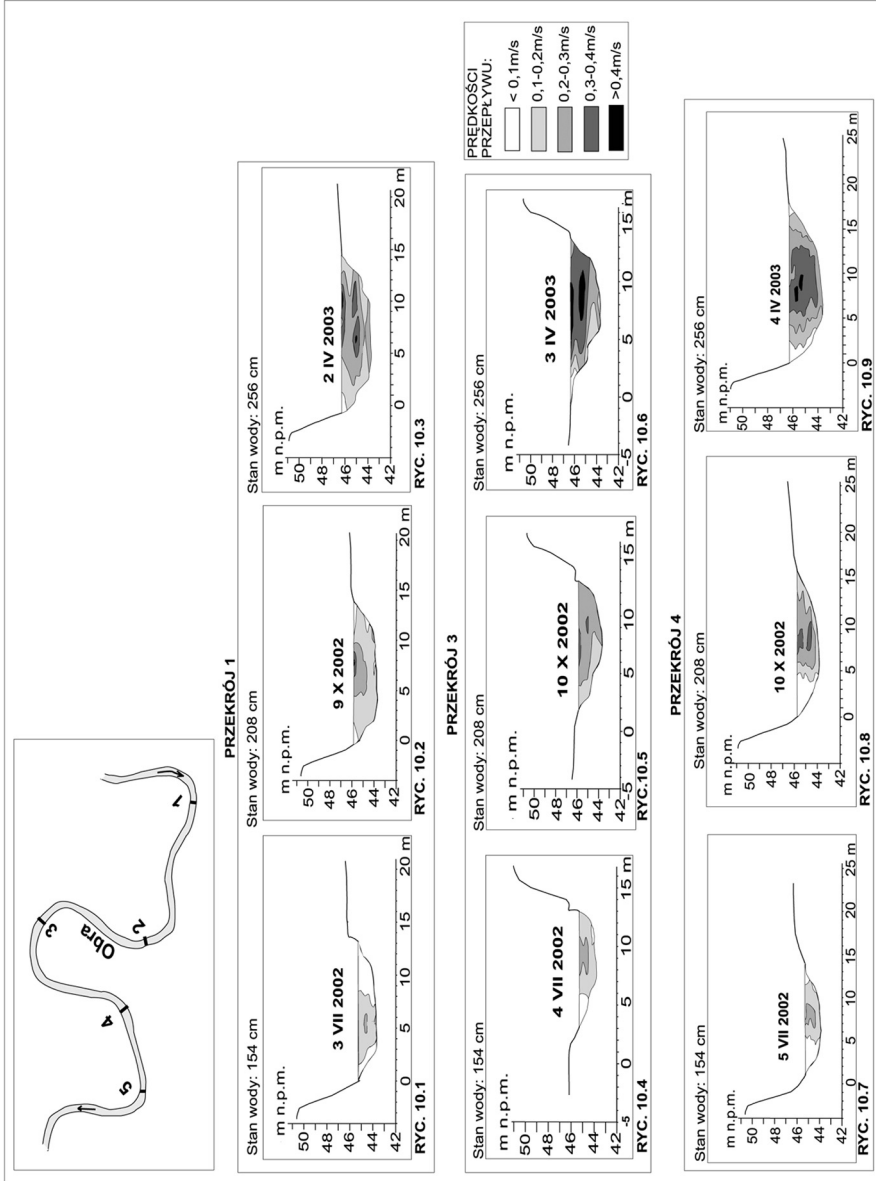


Rys. 9. Zależność między stanem wody a objętością przepływu w okresie objętym pomiarami

Fig. 9. Relation between water stage and discharge values during field research period

Maksymalną prędkość przepływu zanotowano podczas występowania wysokich stanów wody (kwiecień 2003: 256 cm; rys. 10.3, 10.6 i 10.9). Wynosiła ona wówczas $0,48 \text{ m/s}$ w strefie nurtu, która znajdowała się w centralnej części przekroju pierwszego i czwartego. Natomiast w przekroju trzecim charakteryzowała się ona nieznacznym przesunięciem w kierunku brzegu prawego (wklęsłego). Przyczyną tego może być asymetryczny kształt koryta w przekroju nr 3, który usytuowany jest w środkowej części zakola meandrowego. Prędkość przepływu powyżej $0,4 \text{ m/s}$ występowała również w przypowierzchniowej części przekroju pierwszego (rys. 10.3). Podczas występowania wysokich stanów wody prędkość przepływu w nurcie, w strefie przydennej, zawierała się w przedziale $0,2\text{--}0,3 \text{ m/s}$. W miarę przesuwania się ku brzegom wartości prędkości malały do $0,1\text{--}0,2 \text{ m/s}$ (rys. 10.3, 10.6 i 10.9).

Występowaniu średnich stanów wody (październik 2002: 208 cm; rys. 10.2, 10.5 i 10.8) towarzyszyły niższe prędkości przepływu. Nie przekraczały one $0,4 \text{ m/s}$ z wyjątkiem niewielkiego fragmentu przekroju pierwszego w strefie przypowierzchniowej (rys. 10.2). Natomiast w strefie przydennej, w środkowych partiach opisywanych przekrojów, prędkości przepływu wynosiły $0,1\text{--}0,2 \text{ m/s}$ (rys. 10.2, 10.5 i 10.8). Ponadto, w po-



Rys. 10. Zmiany rozkładu prędkości przepływu w wybranych przekrojach poprzecznych koryta Obry przy różnych staniach wody
 Fig. 10. Changes of flow velocity distribution in chosen river bed cross-sections at different water stages in the Obra river

równaniu ze stanami wysokimi, można zauważyć zmniejszenie się przestrzennego zasięgu strefy nurtu oraz zwiększenie się zasięgu prędkości przepływu w przedziale 0,1–0,2 m/s.

W okresie występowania niskich stanów wody (lipiec 2002: 154 cm; rys. 10.1, 10.4 i 10.7) maksymalne prędkości przepływu wynosiły poniżej 0,3 m/s. Pojawiały się one w środkowych i przy powierzchniowych partiach analizowanych przekrojów poprzecznych. W strefie przydennej prędkość przepływu wynosiła poniżej 0,2 m/s, a w pobliżu brzegów – poniżej 0,1 m/s. W strefach brzegowych omawianych przekrojów widoczne jest zwiększenie zasięgu obszaru o prędkości przepływu poniżej 0,1 m/s. W przypadku przekroju pierwszego i czwartego dotyczy to obydwu brzegów (rys. 10.1 i 10.7), natomiast w przypadku przekroju nr 3 – jedynie strefy brzegu lewego (wypukłego) (rys. 10.4). Jest to spowodowane przesunięciem strefy nurtu w kierunku brzegu prawego (wklęsłego) widocznym również w okresie stanów niskich.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawiony w pracy matematyczny model aproksymacji funkcji spline umożliwił przeprowadzenie analizy zmian w rozkładzie prędkości przepływu w korycie Obry, w różnych warunkach hydrologicznych. Najbardziej istotne zaobserwowane zmiany to:

- przesunięcie strefy nurtu w przekroju trzecim w kierunku brzegu prawego (wklęsłego), spowodowane asymetrycznym ukształtowaniem dna koryta (przekrój został założony na zakolu meandrowym);

- zwiększenie zasięgu strefy nurtu w okresie występowania wysokich stanów wody, wynikające ze wzrostu prę-

kości przepływu w okresie wysokich stanów wody,

- zmiany prędkości przepływu w strefach brzegowych koryta Obry (od poniżej 0,1 m/s do nawet 0,3 m/s (w przekroju trzecim w strefie brzegu prawego)),

- zmiany wartości prędkości przepływu w strefie przydennej koryta (wahające się w strefie nurtu od 0,2–0,3 m/s w okresie występowania wysokich stanów wody (kwiecień 2003) do poniżej 0,1 m/s przy niskich stanach wody (lipiec 2002)).

Obserwowane zmiany rozkładu prędkości przepływu wpływają w istotny sposób na zmiany ukształtowania dna koryta rzeczne. Związany jest z nimi proces erozji dna koryta, który może być szczególnie intensywny w okresie wezbrania powodziowego. Ponadto przesunięcie strefy nurtu w stronę brzegu wklęsłego zakola może zainicjować proces akumulacji transportowanego materiału w strefie brzegu wypukłego (tworzenie się osadów budujących odsyp meandrowy). Wartość prędkości przepływu, szczególnie w strefie przydennej, decyduje również o ilości transportowanego przez rzekę materiału; zarówno wleczonego, zawieszzonego, jak i rozpuszczonego.

Oprócz uzyskania rozkładu prędkości za pomocą izotach, matematyczny model funkcji spline umożliwi obliczenie natężenia przepływu. Stanowi ono wynik sumowania powierzchni cząstkowych zawartych między izotachami. Możliwe jest również obliczenie średnich prędkości dla dowolnego teoretycznego założonego pionu hydrometrycznego oraz uzyskanie prędkości przepływu dla dowolnie wyznaczonego punktu w przekroju poprzecznym koryta. Wszystkie obliczenia oraz rysunki przekrojów poprzecznych z izotachami są wykonywane za pomocą programu komputerowego RZEKA.

Wyniki przedstawionych badań stanowią część programu badań zatytułowanego „Natężenie transportu rumowiska w korycie rzeki nizinnej na przykładzie dolnego odcinka Obry”, kierowanego przez Prof. UAM dr hab. Zygmunta Młynarczyka. Fundusze na ten cel udzielił Komitet Badań Naukowych w ramach Grantu nr P04/1215.

LITERATURA

- BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E., 2002: Obieg materii w systemach rzeczno-jeziornych. Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Warszawa, s. 1–274.
- BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E., MAGNUSZEWSKI A., MIKULSKI Z., 1993: Hydrometria. Wyd. Nauk. PWN Warszawa, s. 1–313.
- BARTKOWSKI T., 1956: Z zagadnień geomorfologicznych okolicy Międzyrzecza. *Bad. Fizjogr. nad Pol. Zach. t. III*, PTPN, Poznań, s. 1–61.
- BARTKOWSKI T., 1957: Rozwój polodowcowej sieci hydrograficznej w Wielkopolsce Środkowej. *Zeszyty Naukowe UAM, Geografia 1*, Poznań.
- BRATH A., MONTANARI A., TOTH E., 2004: Analysis of the effect of different scenarios of historical data availability on the calibration of a spatially distributed hydrological model. *Journal of Hydrology* 291, s. 232–253.
- BYCZKOWSKI A., 1999: *Hydrologia*, tom II. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, s. 1–356.
- BYCZKOWSKI A., WICHER M., 1985: Pomiary prędkości przepływu przy zastosowaniu pływaków-integratorów. PAN, Komitet Badań Morza, *Studia i Materiały Oceanologiczne*, 47, *Miernictwo Oceanograficzne*, 5, s. 165–188.
- CHOIŃSKI A., 1988: Zróżnicowanie i uwarunkowania zmienności przepływów rzek polskich. Wyd. Nauk. UAM, Poznań, s. 1–99.
- CHOIŃSKI A., KANIECKI A., KRAJNIAK J., ŻURAWSKI M., 1979: *Wody gminy Międzyrzecz (pod red. M. Żurawskiego)*. Poznań–Międzyrzecz.
- CROKE B.F.W., MERRITT W.S., JAKEMAN A.J., 2004: A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments. *Journal of Hydrology* 291, s. 115–131.
- DYNOWSKA J., 1971: Typy reżimów rzecznych w Polsce. *Zesz. Nauk. UJ CCXVIII*, Prace Georg., z. 28, Prace I. G. z. 50, Kraków, s. 1–155.
- GUTRY-KORYCKA M., 2001: *Geograficzne uwarunkowania ustroju rzek*. Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Warszawa, s. 1–192.
- KELLMAN O., 1998: Guidelines for the use of an Acoustic Doppler Current Profiler. South Florida Water Management District, Hydrologic Data Management Division Technical Report, s. 1–9.
- KOREN V., REED S., SMITH M., ZHANG Z., SEO D.-J., 2004: Hydrology laboratory research modeling system (HL-RMS) of the US national weather service. *Journal of Hydrology* 291, s. 297–318.
- KOWALSKA A., 1960: *Paleomorfologia powierzchni podplejstocenijskiej niżowej części dorzecza Odry*. Instytut Geografii PAN, Prace Geograficzne PAN nr 21, s. 7–75.
- KRYGOWSKI B., 1961: *Geografia fizyczna Niziny Wielkopolskiej – część I. Geomorfologia*, PTPN, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Komitet Fizjograficzny, Poznań, s. 1–203.
- LEBIECKI P., CZERNUSZENKO W., 1987: Pomiary podstawowych charakterystyk turbulencji rzecznej. *Gosp. Wodna*, 3, s. 52–56.
- LI Y., ROY R., 2003: Modelling flow and sediment transport in a river system using an artificial neural network. *Environmental Management Vol. 31*, No. 1, s. 122–134.
- MAJEWSKI J., 1975: *Prędkościomierze termistorowe w problematyce morskiej*. PAN, Kom. Bad. Morza, *Studia i Materiały Oceanograficzne*, 10, *Metrologia Morska*, 1, s. 67–100.
- MŁYNAJCZYK Z., 1996: *Transport materiału piaszczystego w korycie rzeki meandrującej i krętej*. *Acta Quaternaria*, 1, Wyd. Nauk. UAM, s. 1–94.
- MŁYNAJCZYK Z., REN-KURC A., 1999: Mathematical modelling of the velocity and intensity of water discharge in a river channel. *Quaternary Studies in Poland, Special Issue*, s. 263–268.
- MOJSKI E., 1976: *Mapa geologiczna Polski. Skala 1:200 000. Mapa utworów powierzchniowych – mapa podstawowa 1:50 000*. Arkusz Świebodzin. PIG, Warszawa.
- OZGA-ZIELIŃSKA M., BRZEZIŃSKI J., 1997: *Hydrologia stosowana*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, s. 1–323.
- PASŁAWSKI Z., 1973: *Metody hydrometrii rzecznej*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, s. 1–338.

- PIHM, 1970: Wytyczne do wykonywania i opracowania pomiarów przepływu metodą rachunkową. Opr. J. Golek. Instrukcje i podręczniki nr 88.
- Pruska mapa topograficzna 1: 25 000, arkusz Meseritz: „Konigliche Preussische Landes-Aufanhme 1893. Herausgegeben 1895”. Biblioteka Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu.
- SHAMS M., GOODARZ A., DUANE H.S., 2002: Computational modelling of flow and sediment transport and deposition in meandering rivers. *Advances in Water Resources* 25, s. 689–699.
- TOMASZEWSKI E., 1967: „Geomorfologia i geneza doliny Obry”, UAM, Prace Wydziału Biologii i Nauk o Ziemi, seria Geografia nr 3, Poznań, s. 1–61.
- UJDA K. 1985: Wybrane aspekty pomiaru natężenia przepływu wody w korytach otwartych. PAN, Komitet Badań Morza, *Studia i Materiały Oceanologiczne*, 47, Miernictwo Oceanograficzne, 5, Gdańsk, s. 123–144.
- WINNICKI J., 1977: Objasnienia do mapy geologicznej Polski. Arkusz Świebodzin (red. Mojski J.E.). Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, s. 1–42.

Recenzent: prof. dr hab. Alfred Kaniecki

Zygmunt Młynarczyk, Marcin Słowik
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu

CHANGES OF FLOW VELOCITY DISTRIBUTION IN RIVER BED: THE EXAMPLE OF LOWER COURSE OF THE OBRA RIVER

Summary

Discharge in river bed can be measured using many direct methods in field research. However, those methods are not enough to estimate flow velocity in any chosen point in river bed cross-section. This research work presents a spline function method, which allows mathematical modeling of flow velocity. This model also served to calculate the wetted perimeter and total discharge to in the cross-section using isotachs and velocity profiles. The modelling method has been implemented under the RIVER program.

The model of a spline function approximation served to calculate the flow velocity and to demonstrate the distribution of flow velocities in the Obra river bed, in its lower course near Międzyrzecz (the town in the west of

Poland). On the basis of this model it was possible to make detailed analysis of flow velocity changes in the river bed at various water stages. The most important changes, observed during low and high water stages, were differences in spatial extend of maximum flow velocity field in researched cross-sections. One of the reasons of these changes was asymmetrical shape of cross-section profile (in case of cross-section located on meander bend). Another analysis was made to describe flow velocity changes near the bed at different water stages. Presented investigation is essential to describe detailed features of the Obra river regime and needed in further research to determine the changes of bed load transport intensity in various hydrological conditions.