

ZYGUNT MŁYNARCYK, MARCIN SŁOWIK

ZMIANY NATĘŻENIA TRANSPORTU MATERIAŁU
ZAWIESZONEGO W DOLNYM ODCINKU OBRY

ZARYS TREŚCI

Czynniki wpływające na wielkość transportu materiału zawieszzonego decydują o odprowadzaniu znacznej części ładunku materiału z obszaru zlewni rzecznej. Ze względu na dużą ilość takich czynników oraz wzajemne między nimi powiązania zagadnienie zmian wielkości transportu zawiesiny jest bardzo złożone – szczególnie w przypadku badań nad zmianami zmacenia w korycie rzeczonym zachodzącymi podczas wezbrań.

Badania nad zmianami wielkości transportu materiału zawieszzonego w różnych warunkach hydrologicznych przeprowadzono w dolnym odcinku rzeki Obry, w okolicach Międzyrzecza. Pomiarami objęto odcinek doliny Obry o długości 1 km i szerokości 70–150 m. Analiza związku pomiędzy średnią koncentracją materiału zawieszzonego a przepływem umożliwiła wstępne określenie sposobu dostawy materiału do koryta rzeczego w okresie wysokich stanów wody. Ważną rolę w dostawie ze środowiska stokowego mogły pełnić odsłonięcia osadów glacialnych i fluwioglacjalnych znajdujących się w wysokich brzegach wklęsłych koryta Obry. Z kolei w przekrojach nr 4 i 5 normalne pętle histerezy świadczyły o autochtonicznym pochodzeniu transportowanego osadu (głównie z dna koryta oraz ze strefy brzegowej). Ponadto zaobserwowano proces depozycji osadów na fragmencie równiny zalewowej podczas wezbrania, ilustrując w ten sposób mechanizm tworzenia się litofacji środowiska pozakorytowego. Pozwoliło to na przybliżenie warunków, w jakich osady te kształtowały się w przeszłości. Poruszono również zagadnienie zmian wielkości odpływu zawiesiny w wieloleciu. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów oraz danych hydrologicznych z wodowskazu Międzyrzecz obliczono wartości transportu odpływu zawiesiny dla lat 1971–1991. Czynnikiem decydującym o zmianach wartości transportu była częstość występowania wysokich stanów wody, które wpływały na warunki hydrauliczne w korycie rzeczonym. Znaczenie miały także stany wezbraniowe (znacznie przekraczające 300 cm), w czasie których zwiększone były możliwości dostawy zawiesiny do koryta z obszaru równiny zalewowej oraz ze środowiska stokowego.

WPROWADZENIE

Transport materiału zawieszzonego decyduje o odprowadzaniu znacznej części ładunku materiału z obszaru zlewni rzecznej. Wielkość odprowadzanego ładunku zawiesiny jest uwarunkowana wieloma czynnikami, takimi jak klimat, budowa geologiczna podłoża zlewni i rzeźba terenu. Wymienione elementy środowiska przyrodniczego wpływają z kolei w bezpośredni sposób na cechy reżimu hydrologicznego (częstość i intensywność wezbrań powodziowych, dłu-

gość okresów niżówkowych, warunki przepływu wody w korycie rzeczonym). Duża liczba czynników decydujących o transporcie zawiesiny powoduje, że koncentracja materiału zawieszzonego w korycie rzeczonym podlega częstym i trudnym do uchwycenia zmianom. Zmiany te zachodzą szczególnie szybko podczas wezbrania, kiedy wartość zmacenia może wzrosnąć nawet o kilka rzędów wielkości (ALLEN 2000). Dla okresów wezbrań powodziowych szczególnie istotnych informacji dostarcza analiza związku pomiędzy koncentracją zawiesiny

a przepływem. Kształt tej zależności stanowi wyraz procesów erozji i transportu zachodzących na obszarze zlewni. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na efekt histerezy, w przypadku którego kształt powyższego związku przyjmuje postać pętli. Histereza tej zależności związana jest z dostawą lub/i wyczerpywaniem się materiału dostępnego do transportu w korycie rzeczonym (FROEHLICH 1982). W zależności od sposobu dostawy transportowanego materiału do koryta pętle histerezy mogą przebiegać normalnie (zgodnie z ruchem wskazówek zegara), kiedy materiał jest autochtoniczny, lub odwrotnie, kiedy pochodzi on z bardziej odległych źródeł dostawy. Właściwość tę badacze obserwowali zarówno w zlewniach rzecznych obszarów młodoglacjalnych (KOSTRZEWSKI i in. 1994), jak i górskich (FROEHLICH 1975, 1982; WILLIAMS 1989 w: SEEGER i in. 2004; LENZI, MARCHI 2000). W badaniach prowadzonych w zlewniach rzecznych w strefie klimatu śródziemnomorskiego autorzy zaobserwowali występowanie efektu histerezy w postaci pętli w kształcie „ósemki”. Zauważyli oni, iż przyczyną takiego zjawiska jest pojawienie się po długim okresie suszy kilku następujących bezpośrednio po sobie wezbrań dających efekt pętli normalnych i odwrotnych (SEEGER i in. 2004).

Problem badawczy związany ze zmianami koncentracji oraz natężenia transportu materiału zawieszono w różnych warunkach hydrologicznych poruszono w ramach badań przeprowadzonych w dolnym odcinku rzeki Obry. Wybór rzeki do badań nie był przypadkowy. Obra jest największym ciekim wodnym położonym między Wartą a Odrą, który przepływa przez środkową i zachodnią część Niziny Wielkopolskiej. Koryto Obry od początku XIX w. było intensywnie przekształcane. 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 (rys. 1, odcinek 3) 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 (PASLAWSKI 1973 w: CHOIŃSKI 1988; BYCZKOWSKI 1999; BAJKIEWICZ-GRABOWSKA 2002).

Przedstawione w pracy badania wykonano w dolnym odcinku rzeki Obry, w pobliżu miejscowości Św. Wojciech, 3,5 km na północny zachód od Międzyrzecza. Jest to odcinek meandrowy, na którym prace hydrotechniczne były ograniczone i w zasadzie bezpośrednio nie zmieniły układu geometrii koryta rzeczno, a także nie zakłóciły struktury osadów aluwialnych zdeponowanych w przeszłości.

Głównym celem przeprowadzonych badań było określenie zmian natężenia transportu materiału zawieszono przy różnych warunkach hydrologicznych w dolnym odcinku rzeki Obry. Do realizacji celu głównego posłużyły następujące zadania cząstkowe:

1. Analiza zmian wielkości średniej koncentracji zawiesiny w badanych przekrojach poprzecznych. Dane uzyskane z pomiarów pozwoliły na przedstawienie zmian zmęczenia w korycie Obry w różnych warunkach hydrologicznych.

2. Charakterystyka zależności pomiędzy średnią koncentracją zawiesiny a objętością przepływu. Szczególna uwaga została poświęcona efektowi hi-

sterezy, jaki wystąpił w czasie wezbrania w marcu 2002 r. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów podjęto próbę wstępnego określenia źródeł dostawy materiału do koryta rzecznego.

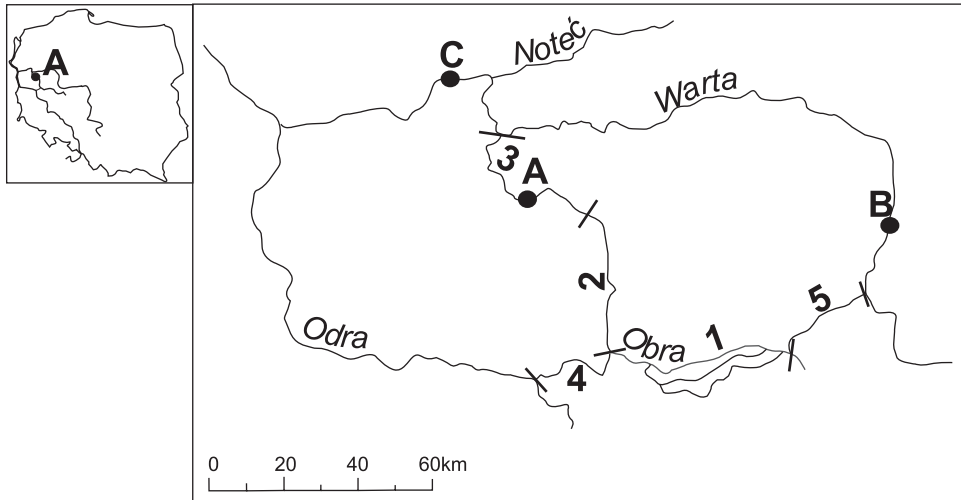
3. Analiza zmienności wskaźników uziarnienia osadu powodziowego zdeponowanego na równinie zalewowej podczas wezbrania. Przybliżony został w ten sposób mechanizm działania procesów wpływających na pionową agradację osadów na równinie zalewowej.

4. Obliczenie wielkości całkowitego odpływu zawiesiny dla lat hydrologicznych 1971–1991. Dane te pozwoliły na porównanie wielkości odpływu zawiesiny w miesiącach półroczia letniego i zimowego w latach hydrologicznych suchych i wilgotnych. Porównanie to stanowi in-

formację o intensywności procesów denudacyjnych zachodzących na obrębie badanego fragmentu doliny Obry.

POŁOŻENIE GEOGRAFICZNE I PRZEBIEG DOLINY OBRY

Źródła Obry znajdują się na wysokości 145 m n.p.m., w odległości ok. 2,5 km od wsi Obra Stara, na południe od Jarocina. 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 uję-



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

1 – odcinek Kościan–Kargowa (Pradolina Warszawsko-Berlińska), 2 – odcinek Kargowa–Policko, 3 – odcinek Policko–Skwierzyna, 4 – bifurkacja Obry (ujście do Odry koło Cigacic), 5 – ujście do Warty (Kanał Mosiński), A – Międzyrzecz, B – Poznań, C – Gorzów

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 Cigacic), 5 – outlet to Warta (Mosiński channel). A – Międzyrzecz, B – Poznań, C – Gorzów

ta jest w kanał z systemem śluz i przepustów. Na odcinku 1 (rys. 1) rzeka jest rozdzielona na trzy kanały: północny, środkowy i południowy. W okolicach Mosiny znajduje się ujście do Warty (Kanał Mosiński) (rys. 1, odcinek 5). Natomiast naturalne ujścia 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 (rys. 1, odcinek 2). Na omawianym odcinku występują jeziora przepływowe (Chobienickie, Grójeckie, Nowowiejskie, Zbąszyńskie, Lutol, Młyńskie i Wielkie). W dalszym swoim biegu, na odcinku pomiędzy Rybojadami a Polickiem, Obra charakteryzuje się przebiegiem zbliżonym do prostoliniowego. Szerokość doliny wynosi tu ok. 200–250 m. Taki układ koryta rzeczno jest efektem prac hydrotechnicznych. Zmiany te ilustrują mapy tograficzne z lat 1895 i 1934.

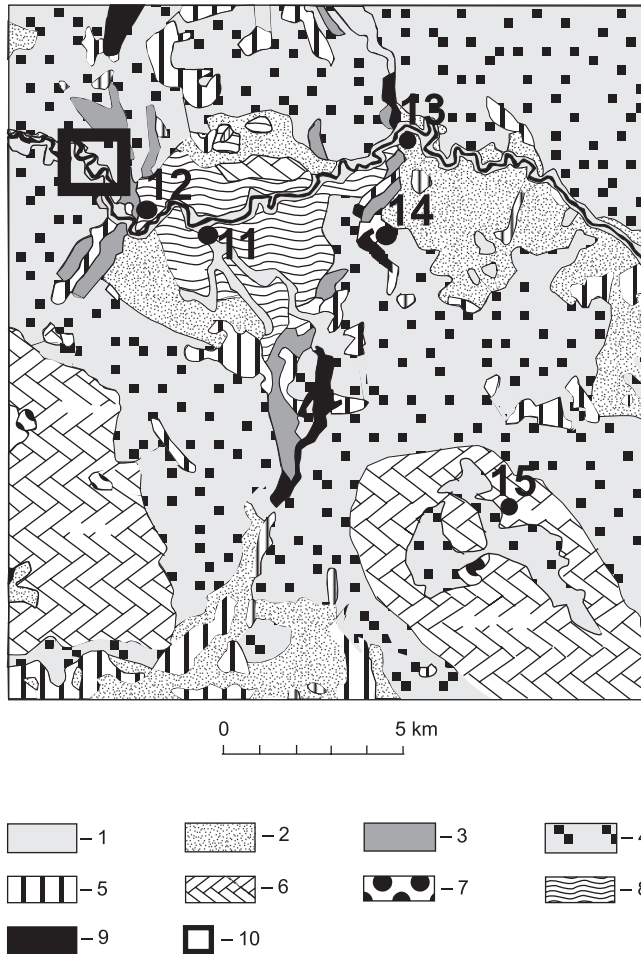
OBSZAR BADAŃ

Badania nad zmianami natężenia transportu zawiesiny przeprowadzono w dolnym odcinku Obry, znajdującym się na obszarze Obniżenia Obry (rys. 1, odcinek 3). Jest to wklęsła forma terenu przebiegająca w kierunku NW-SE, co nawiązuje do podplejstoczeńskiego 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).

Do badań wybrano odcinek doliny rzeki Obry o długości 1000 m i szerokości wahającej się od 70 do 150 m, położony ok. 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 fluwiogłacjalne piaski drobnoziarniste, widoczne w kilku odsłonięciach występujących w brzegach wklęsłych zakoli meandrowych. Gлина morenowa stanowi również podłoże osadów aluwialnych występujących w dnie doliny Obry.

BEZPOŚREDNIE METODY POMIARU NATĘŻENIA TRANSPORTU MATERIAŁU ZAWIESZONEGO W KORYCIE RZECZNYM

Podstawowym przyrządem służącym do poboru próbek wody jest batometr butelkowy PIHM (PIHM 1970). Ilość próbek pobranych z przekroju pomiarowego zależy od szerokości i głębokości koryta oraz od stopnia rozpoznania reżimu transportu osadów w korycie rzeczonym. Według instrukcji PIHM (1970) próbki wody na określenie stopnia zmaczenia pobiera się z głębokości 0,2, 0,4 i 0,8 h (h – głębokość koryta). Oprócz batometrów istnieją inne przyrządy, umożliwiające wyznaczenie koncentracji zawiesiny przy wykorzystaniu pomiaru właściwości akustycznych wody, które ulegają zmianie w zależności od zmian zmaczenia (KLEINHANS, TEN BRINKE 2001; Delft Hydraulic Laboratory 2005). W metodzie tej wykorzystuje się



Rys. 2. Mapa geologiczna utworów powierzchniowych. Arkusz Świebodzin (MOJSKI 1976; WINNICKI 1977)

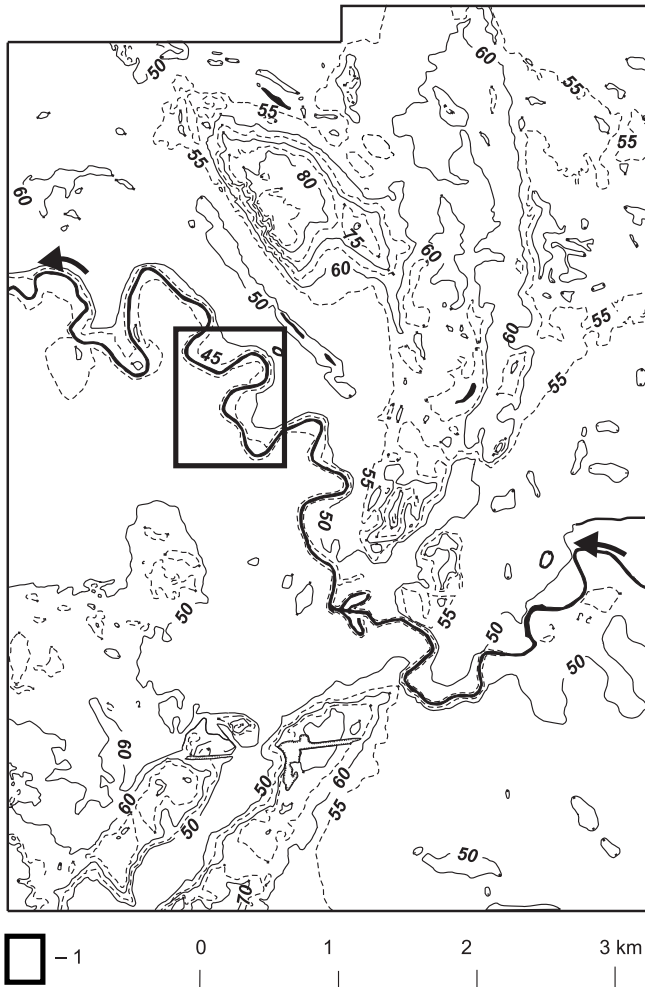
1 – piaski, mułki i żwiry rzeczne (holocen), 2 – piaski, mułki i żwiry rzeczne (złod. północnopolskie, faza pomorska), 3 – piaski i żwiry ozów, 4 – piaski i żwiry wodnolodowcowe (złod. północnopolskie, faza poznańsko-dobrzyńska), 5 – torfy (holocen), 6 – glina zwałowa lub jej rezidua, 7 – piaski, żwiry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

Fig. 2. Surface sediments geologic map. Localization: Świebodzin (MOJSKI 1976; WINNICKI 1977)

1 – river sands, silts and gravels (Holocene), 2 – river sands, silts and gravels (Północnopolskie glacial period, Pomeranian phase), 3 – sands and gravels in eskers, 4 – fluvioglacial sands and gravels (Północnopolskie 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 – detailed research area. Main towns and villages: 11 – Międzyrzecz, 12 – Św. Wojciech, 13 – Zółwin, 14 – Bobowicko, 15 – Bukowiec

pomiar zmian częstotliwości i stopnia rozproszenia fal ultradźwiękowych. Na tej podstawie określa się stopień koncentracji i prędkość poruszania się cząstek materiału transportowanego w zawiesinie (Delft Hydraulic Laboratory 2005). Do pomiaru stopnia zmącenia stosuje się również metody uwzględniające optyczne właściwości wody (Delft Hy-

draulic Laboratory 2005). Inna metoda opiera się na pomiarze zmian właściwości dielektrycznych mieszaniny woda-osad (XIAOYU i in. 2005; Delft Hydraulic Laboratory 2005). Właściwości te zmieniają się wraz z różną zawartością zawieszonoego w wodzie materiału piaszczystego. Pomiar dokonywany jest za pomocą sensorów wyposażonych



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

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

w materiał dielektryczny. Badania eksperymentalne, przeprowadzane w mieszaninach o różnej koncentracji materiału, wykazały, że przy koncentracji zawiesiny przekraczającej 70% mieszaniny, prędkości przepływu przekraczającej 2 m/s oraz zasoleniu przekraczającym 0,2% pojawiają się znaczne błędy (XIAOYU i in. 2005). Natomiast przy niskich prędkościach przepływu i niskich koncentracjach zawiesiny wyniki uzyskiwane tą metodą odpowiadały z góry zadanym koncentracjom zawiesiny w kształcie zbliżonym do liniowego (XIAOYU i in. 2005).

METODY OBLICZENIOWE

Do obliczenia wielkości transportu zawiesiny w korycie rzeczonym wykorzystuje się koncentrację zawiesiny w pobranych próbkach wody, którą określa się przy zastosowaniu metody wagowej (BRAŃSKI 1968). Natężenie transportu materiału zawieszonego określa się poprzez scałkowanie po szerokości i głębokości pola prędkości przepływu i pola zmęczenia (BAJKIEWICZ-GRABOWSKA i in. 1993):

$$S_s = \int_0^B \int_0^h vP dx dy,$$

gdzie: S_s – natężenie transportu zawiesiny [$g s^{-1}$], v – prędkość przepływu wody [$m s^{-1}$], P – koncentracja zawiesiny [$g m^{-3}$].

Natężenie transportu zawiesiny można obliczyć również na podstawie opartej na danych pomiarowych zależności pomiędzy średnią koncentracją zawiesiny a objętością przepływu. Metoda ta jest jednak mniej dokładna ze względu na brak ścisłej zależności między tymi dwiema zmiennymi (BAJKIEWICZ-GRABOWSKA i in. 1993).

W literaturze hydrologicznej przedstawionych jest wiele modeli wyko-

rzystywanych do obliczenia wielkości transportu zawiesiny. Jeden z nich uwzględnia zróżnicowanie materiału zawieszonego pod względem średnicy ziarna poprzez podział mieszaniny osadu na szereg frakcji, wewnątrz których zakłada się jednorodność transportowanego materiału (QING-CHAO, YEE-CHUNG 2002). Model ten uwzględnia wymiennosc pomiędzy materiałem transportowanym w zawieszynie oraz poprzez wleczenie (QING-CHAO, YEE-CHUNG 2002). Należy jednak zaznaczyć, że wymienieni autorzy przeprowadzili weryfikację przydatności tego modelu w odniesieniu do rzeki Jangcy, o przepływie sięgającym $40000 m^3/s$. Brakuje natomiast określenia takiej przydatności w mniejszych ciekach. Podział transportowanej zawiesiny na frakcje uziarnienia zakłada również model STAND (Sediment-Transport-Associated Nutrient Dynamics) (ZENG, BECK 2003). Model ten cechuje trzypoziomowa struktura. Pierwszy poziom odnosi się do dynamiki przepływu wody w korycie rzeczonym (opisanej za pomocą równań St. Venanta). Drugi służy do obliczenia wielkości transportu zawiesiny, przeprowadzanego na podstawie danych uzyskanych w poziomie pierwszym oraz danych pomiarowych (ZENG, BECK 2003). Trzeci poziom pozwala na ujęcie zmian koncentracji zanieczyszczeń w korycie rzeczonym jako funkcji transportu przy uwzględnieniu ich adsorpcji i desorpcji względem materiału zawieszonego (ZENG 2000 w: ZENG, BECK 2003). Wymienieni autorzy przedstawili zastosowanie tego modelu w odniesieniu do odcinka doliny rzecznej „zamkniętego” posterunkami wodowskazowym, na których prowadzono pomiary przepływu, wielkości transportu rumowiska i zmian kształtu koryta oraz analizy zmian uziarnienia transportowanego materiału. Uwzględniono również dane pomiarowe z wielolecia.

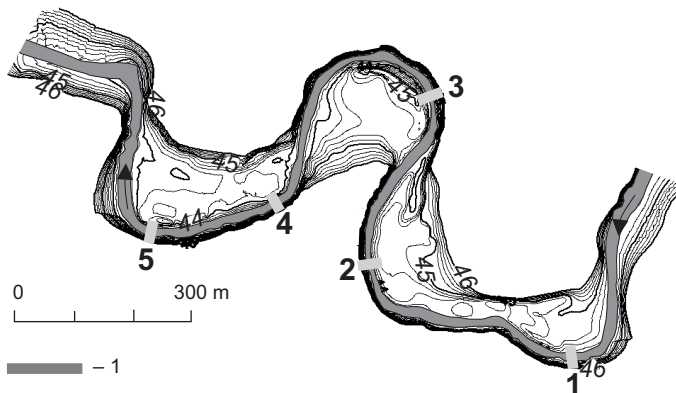
Do obliczenia wielkości transportu zawiesiny wykorzystywane były również modele sieci neuronowej MLP (multi-layer perceptrons) (CIGIZOGLU 2004). Autor ten zwraca uwagę, że struktura modelu sieci neuronowej pozwala na prowadzenie symulacji nieliniowego charakteru zmian wielkości transportu zawiesiny, zaznacza jednak, że w przypadku symulacji dotyczących lokalnych, skokowych wzrostów wartości transportu mogą się pojawić błędy nie przekraczające 20%.

Inne badania, poświęcone zmianom średnicy materiału transportowanego w zawieszynie, wykazały, że w środkowym biegu Żółtej Rzeki (Chiny) istnieje związek pomiędzy wielkością średnicy ziarna materiału zawieszzonego a wielkością opadów w danym roku hydrologicznym, rodzajem osadów tworzących dany fragment zlewni oraz działalnością wiatru (JIONGXIN 1999). Autor ten zaobserwował, że przy niskich stanach wody oraz w czasie ekstremalnych wezbrań materiał zawieszony jest stosunkowo gruby. Natomiast w okresie występowania wysokich stanów wody zawieszina składa się z drobniejszych frakcji.

SUKHODOŁOV i in. (2004) poruszyli problem zmian koncentracji zawiesiny oraz depozycji drobnego materiału pomiędzy sztucznymi ostrogami rzecznyymi. Zaobserwowali oni, że koncentracja zawiesiny w strefie przybrzeżnej może wzrosnąć nawet o 17% na skutek falowania wywołanego ruchem statków rzecznych. Zdeponowany wcześniej materiał jest ponownie przemieszczany w zawieszynie pod wpływem falowania, a następnie redeponowany (SUKHODOŁOV i in. 2004). Badacze ci wskazują, że często ignorowane czynniki (falowanie spowodowane przez wiatr i ruch statków) mogą znacząco zmienić prędkości przepływu i warunki sedymentacji osadów w strefach brzegowych.

ZASTOSOWANE METODY BADAŃ

Pomiary hydrologiczne w korycie Obry przeprowadzono w okresie od 2 lutego 2002 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 przepływu mie-



Rys. 4. Położenie przekrojów pomiarowych (1)

Fig. 4. Location of river bed cross-sections (1)

rzono 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: 0,2, 0,4 i 0,8 h (h – głębokość koryta) oraz przy powierzchni. Liczba punktów, w których wykonano pomiary, jest większa, co wynika z przeznaczenia danych pomiarowych do określenia zależności pomiędzy zmiennymi charakteryzującymi przepływ a natężeniem transportu rumowiska w przekroju koryta rzeczno-go. Prędkość przepływu mierzono punktowo w każdym pionie – w odległości od dna 0,1, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 i 3,0 m, jak również pod powierzchnią zwierciadła wody.

W każdej serii pomiarowej odczytywano wysokość stanu wody z łaty wodowskazowej umieszczonej na wodowskazie IMGW w Międzyrzeczu. Jest on ulokowany w odległości 42,8 km od ujścia Obry w Skwierzynie i zamyka obszar dorzecza Obry o powierzchni 2116 tys. km². Należy dodać, że systematyczne obserwacje stanów wody zostały zakończone przez IMGW 30 kwietnia 1992 r. Obecnie najbliższymi wodowskazami, na których prowadzi się pomiary, są wodowskazy ulokowane w Zbąszyniu i Bledzewie.

Podczas przeprowadzonych pomiarów pobrano łącznie 800 próbek wody w celu określenia wagowych zawartości zawiesiny, które uzyskano w warunkach laboratoryjnych przy zastosowaniu metody wagowej (BRAŃSKI 1968). Ponadto, w celu określenia uziarnienia współcześnie deponowanych osadów powodziowych, dokonano poboru 30 próbek osadu świeżo utworzonego przez wody

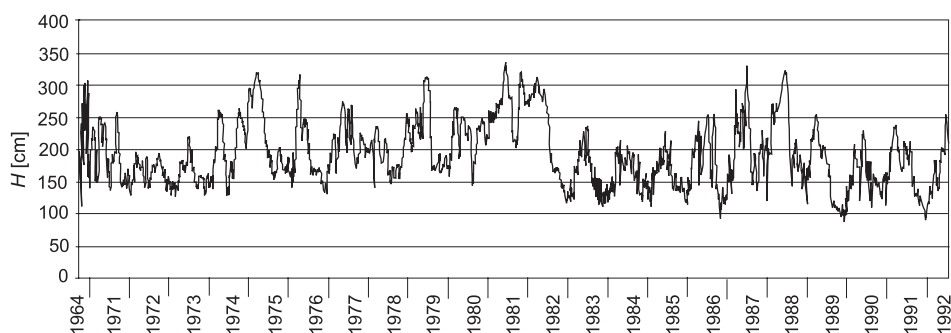
wezbraniowe na powierzchni równiny zalewowej. Próbkę pobrano w pobliżu przekrojów nr 1, 2 i 3, gdzie zakumulowany materiał zajmował największą powierzchnię.

CHARAKTERYSTYKA HYDROLOGICZNA DOLNEGO ODCINKA OBRY

„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 Obry oparto na zmienności stanów wody występujących w korycie rzeki Obry w przekroju Międzyrzecz w latach 1964–1992. Dla okresu późniejszego brakuje danych, bowiem w roku 1992 (30 kwietnia) 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 wyznaczane stałe piętrzenia w Zbąszyniu przy wypływie Obry z Jeziora Zbąszyńskiego oraz ze względu na zaporę wodną w Bledzewie i związane z nią sztuczne piętrzenie wody.

Obra charakteryzuje się regularnym rytmem wahań stanów wody (rys. 5). W analizowanym wieloletnim wezbraniu powodziowe występowały najczęściej



Rys. 5. Zmiany stanów wody (H) w przekroju Międzyrzecz – lata 1964–1992

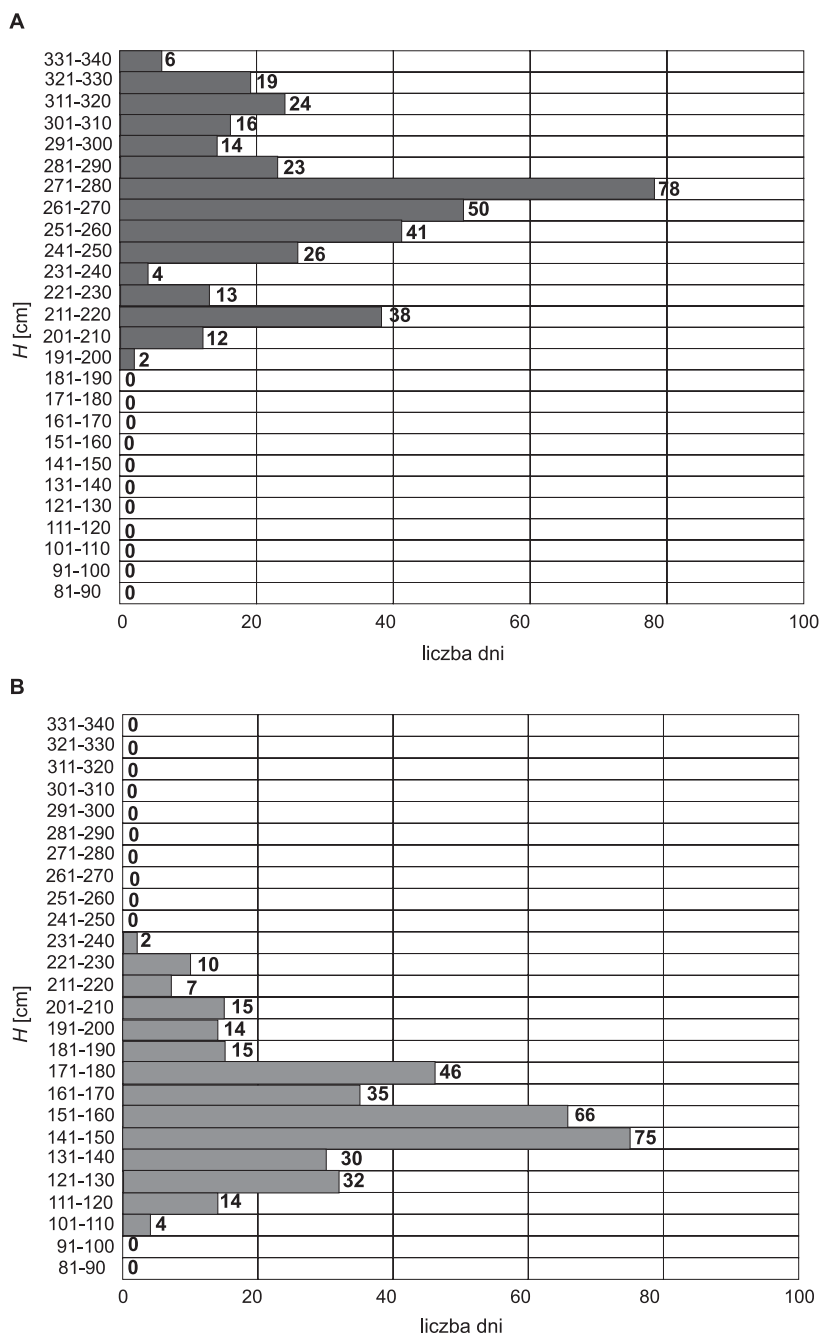
Fig. 5. Changes of water stages (H) in Międzyrzecz water-gauge – years 1964–1992

w miesiącach zimowych i wczesnowiosennych (luty–kwiecień). Najwyższe zanotowane stany wody przekroczyły 300 cm (maksymalnie 340 cm w marcu 1981 r.). Stany niżówkowe występowały głównie w miesiącach letnich i jesiennych (minimum: 81 cm w październiku 1989 r.). W okresie letnim pojawiały się wezbrania opadowe. Były one jednak krótkotrwałe w porównaniu z wezbraniem okresu wiosennego, często powodowanymi roztopami. Na rys. 6A i 6B przedstawiono diagramy ilustrujące liczbę dni z daną wartością stanu wody. W roku wilgotnym stany wody występowały najczęściej w przedziale 271–280 cm (rys. 6A), natomiast w roku suchym – w przedziale 141–150 cm (rys. 6B). Najwyższe zanotowane stany wody w roku 1981 sięgnęły 340 cm (rys. 6A), a w roku 1990 osiągnęły jedynie 240 cm (rys. 6B). Tak znaczne różnice w wartościach stanów wody znalazły swoje odbicie w warunkach przepływu w korycie Obry oraz w wielkości transportowanego ładunku materiału zawieszzonego.

Zasilanie rzeki Obry można zaliczyć do reżimów śnieżno-deszczowych z jednym maksimum i jednym minimum w ciągu roku. Potwierdza to poglądy DYNOWSKIEJ (1971), której zdaniem jest to reżim

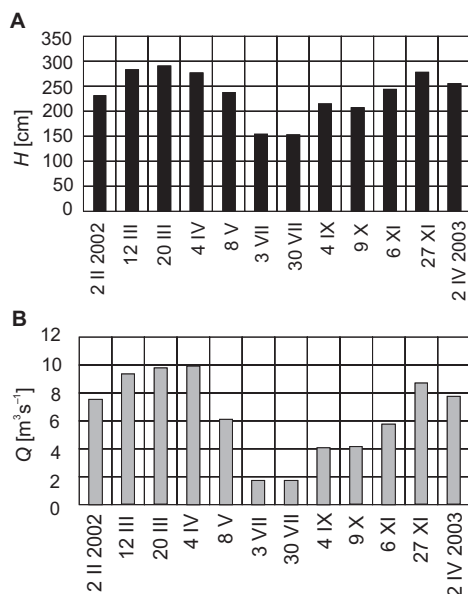
zaliczany do grupy umiarkowanej z wezbraniem wiosennym oraz gruntowo-deszczowym zasilaniem. Należy jednak zauważyć, że w analizowanym wieloleciu wystąpiły lata, w których wysokie stany wody utrzymywały się przez bardzo długi czas. Przyczyniła się do tego wielkość opadów atmosferycznych, których miesięczne sumy były wysokie nie tylko w miesiącach letnich, ale również wczesnowiosennych i jesiennych. Przykładem tego rodzaju stanowi rok hydrologiczny 1981 (rys. 5). Z kolei w latach suchych można zauważyć znaczne wydłużenie okresów stanów niskich, które, oprócz miesięcy wiosennych, trwały nieprzerwanie aż do okresu zimowego (lata 1983, 1984 i 1985; rys. 5). Jako istotny czynnik wpływający na reżim hydrologiczny Obry należy wymienić obecność jezior przepływowych, które wpływają na zmniejszenie amplitudy wahań stanów wody (CHOIŃSKI 1988; BAJKIEWICZ-GRABOWSKA 2002). Wpływ jezior zaznacza się wyrównaniem odpływu poprzez obniżenie wielkości przepływów kulminacyjnych, rozłożeniem wezbrań w dłuższym okresie oraz podwyższeniem stanów niżówkowych (BYCZKOWSKI 1999).

W okresie objętym pomiarami (od 2 lutego 2002 do 4 kwietnia 2003 r.) naj-



Rys. 6. Częstość występowania stanów wody (H) w wybranym roku wilgotnym (1981; A) i suchym (1990; B)

Fig. 6. Frequency of water stages (H) in chosen wet (1981; A) and dry (1990; B) hydrological year



Rys. 7. Zmienność stanów wody (H) i przepływów (Q) w okresie objętym badaniami (2 II 2002 – 4 IV 2003)

Fig. 7. Water stage (H) and discharge (Q) changes during field research period (2 II 2002 – 4 IV 2003)

wyższe stany wody zanotowano wiosną (12 III 2002: 284 cm, 20 III: 292 cm i 4 IV: 277 cm; rys. 7A) oraz późną jesienią (27 XI 2002: 278 cm), przy objętości przepływu wynoszącej maksymalnie 10 m³/s (rys. 7B). Natomiast w okresie letnim wystąpiły długotrwałe stany niskie, wynoszące w lipcu i sierpniu 154 cm (rys. 7A), przy objętości przepływu poniżej 2 m³/s (rys. 7B). Największe wezbranie zanotowano w miesiącach wiosennych. Miało ono charakter opadowy. W czasie jego trwania maksymalnym zarejestrowanym stanom wody towarzyszyły największe wartości przepływu (14 III 2002: 9,32 m³/s, 21 III: 9,71 m³/s i 5 IV: 9,89 m³/s) (rys. 7A, B). Podczas tego wezbrania maksymalny przepływ wystąpił 5 IV 2002.

ZMIANY ŚREDNIEJ KONCENTRACJI ZAWIESINY W OKRESIE WEZBRANIA (MARZEC–KWIECIEŃ 2002)

Badania FROEHLICHA (1975) wskazują, że podczas wezbrań maksimum zmaczenia wyprzedza najczęściej kulminację przepływu. Zdarza się jednak, że występuje ono równocześnie z maksymalnym przepływem. Wskazuje to na złożony mechanizm dostawy drobnego materiału do transportu (FROEHLICH 1975). Może być to również związane ze zróżnicowaniem natężenia opadów w różnych częściach zlewni i opóźnionymi procesami grawitacyjnymi (FROEHLICH 1982). Autor ten uzależnia ponadto zróżnicowanie natężenia transportu zawiesiny od gwałtowności wzrostu przepływu, która uwarunkowana jest natężeniem deszczu lub szybkością ablacji pokrywy śnieżnej (FROEHLICH 1975). Pomiarzy przeprowadzone w korycie Obry potwierdziły obserwacje tego autora, wskazując podczas wezbrania na występowanie maksymalnego zmaczenia równocześnie z maksymalnym przepływem. Sytuację taką zaobserwowano w pierwszym, drugim i trzecim przekroju pomiarowym w kwietniu 2002 r., w początkowej fazie opadania fali wezbraniowej (rys. 8A, B, C i 9A, B, C). Koncentracja materiału zawieszonego w tych przekrojach wzrosła maksymalnie do 19,65 mg/l w przekroju trzecim. Jednocześnie zaobserwowano wzrost objętości przepływu, który osiągnął maksymalną wartość podczas kwietniowej serii pomiarowej (10,01 m³/s; rys. 7B).

Wzrost koncentracji zawiesiny obserwowany nie w czasie kulminacji wezbrania, lecz w początkowej fazie opadania stanu wody (kwiecień 2002), mógł być związany z dostawą materiału ze środowiska stokowego. Przemawia za tym usytuowanie przekroju nr 1 w pobliżu fragmentu brzegu wklęsłego, poddawanego intensywnej erozji bocznej.

Widoczne są w tym miejscu ślady osunięć znacznej ilości materiału (fot. 1). Jest to miejsce, w którym dostawa materiału zawieszzonego ze środowiska stokowego do środowiska korytowego była szczególnie ułatwiona.

W przypadku trzeciego przekroju pomiarowego źródło dostawy materiału do koryta mógł stanowić wysoki brzeg wklęsły z widocznymi śladami osunięć w sąsiedztwie opisywanego profilu (fot. 2).

Nieco innym przebiegiem charakteryzowały się zmiany koncentracji zawiesiny w przekroju czwartym i piątym (rys. 8D, E i 9D, E). Podczas wezbrania zanotowano tu najpierw znaczny wzrost koncentracji materiału zawieszzonego (w przekroju nr 4: 16,15 mg/l), a podczas pomiaru na początku kwietnia jej spadek (rys. 8D).

Jak wspomniano wcześniej, w czasie kwietniowej serii pomiarowej zanotowano największe wartości przepływu. W dwóch omawianych przekrojach w trakcie wezbrania powodziowego wystąpił efekt histerezy w postaci pętli normalnej (rys. 9D i E).

Można zatem przypuszczać, że transportowany materiał był autochtoniczny – pochodził z dna koryta oraz jego najbliższego otoczenia (KRZEMIEN, ŚWIĘCHOWICZ 1992 w: KOSTRZEWSKI i in. 1994). Autorzy badań prowadzonych w zlewniach rzecznych obszaru młodogłajalnego wskazali na związek tego rodzaju dostawy osadów ze spływami powierzchniowymi i śródpokrywowymi (KOSTRZEWSKI i in. 1994).

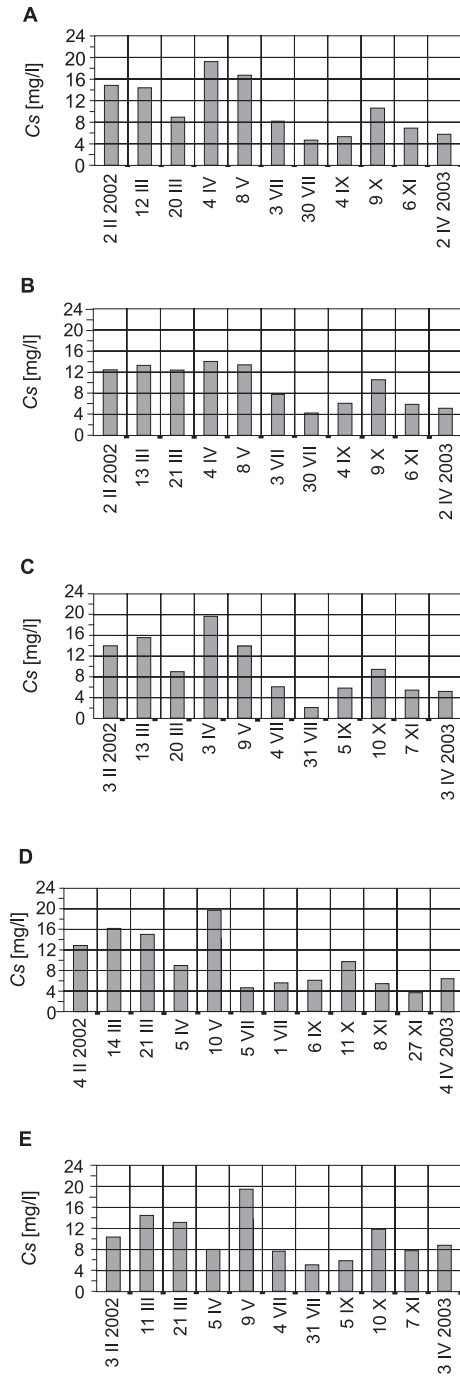
ZMIANY ŚREDNIEJ KONCENTRACJI ZAWIESINY W OKRESIE WYSTĘPOWANIA ŚREDNICH STANÓW WODY

Wysokie wartości średniej koncentracji zawiesiny w badanych przekrojach poprzecznych stwierdzono w maju 2002 r.

(od 13,39 mg/l w przekroju drugim do 19 mg/l w przekroju czwartym; rys. 9). Objętość przepływu wynosiła w tym czasie ok. 6 m³/s. Na podstawie przeprowadzonych badań trudno jest wyjaśnić przyczynę takiego wzrostu. Był to przypuszczalnie efekt zanieczyszczeń z obszarów rolniczych i z Międzyrzecza. W trakcie kolejnych pomiarów, przeprowadzanych w okresie występowania przepływów przekraczających 4 m³/s (wrzesień i październik 2002 r.), w porównaniu z okresem letnim stwierdzono wzrost koncentracji materiału zawieszzonego, maksymalnie do ponad 10 mg/l w przekroju nr 1 (9 X 2002). Następnie, przy coraz wyższych notowanych przepływach w listopadzie 2002 r. (przekrój nr 4; 27 XI 2002 – ponad 8 m³/s) i kwietniu 2003 (ponad 7 m³/s), koncentracje zawiesiny były niższe. Wahały się one od 3,74 mg/l w przekroju czwartym do 8,74 mg/l w przekroju piątym.

ZMIANY ŚREDNIEJ KONCENTRACJI ZAWIESINY W OKRESIE NISKICH STANÓW WODY

Najniższe koncentracje zawiesiny zaobserwowano w miesiącach letnich (lipiec i sierpień 2002 r.) we wszystkich przekrojach (rys. 8). W okresie tym wahały się one od 2,1 mg/l w przekroju nr 3 do 8,17 mg/l w przekroju nr 1. Niskim koncentracjom materiału zawieszzonego towarzyszyły niskie wartości przepływu (poniżej 2 m³/s). Okres ten był poprzedzony niskimi sumami opadów w maju (34,2 mm) i czerwcu (27,7 mm). Również w lipcu występowały okresy braku opadów lub ich bardzo niewielkich ilości. Natężenie transportu zawiesiny było w tym czasie nieduże, proces ten zachodził jednak nieustannie. Świadczy to o dużej roli procesów erozyjnych w obrębie koryta rzecznej w odprowadzaniu materiału w dół rzeki, poza badany



fragment doliny (KOSTRZEWSKI i in. 1994). Stosunkowo długi okres niskich stanów wody i przepływów wpłynął na obniżenie możliwości transportowych rzeki (niskie ładunki zawiesiny w okresie 4 VII – 31 VII 2002).

ZMIENNOŚĆ WSKAŹNIKÓW UZIARNIENIA OSADÓW ZDEPONOWANYCH W OKRESIE WYSTĘPOWANIA WYSOKICH STANÓW WODY

W okresie występowania wysokich stanów wody na fragmencie równiny zalewowej zajętej przez wody wezbraniowe doszło do akumulacji 3-centymetrowej warstwy osadu (rys. 10). Można przypuszczać, że materiał ten podlegał głównie transportowi w zawieszynie. Wskazywały na to niskie prędkości przepływu zmierzone na zalanym fragmencie dna doliny. Przekraczały one nieznacznie 0,1 m/s na każdym z analizowanych przekrojów pomiarowych. Po ustąpieniu

Rys. 8. Zmiany koncentracji materiału zawieszono-
nego (C_s) w przekrojach poprzecznych koryta
Obry

A – przekrój nr 1, B – przekrój nr 2, C – przekrój nr 3,
D – przekrój nr 4, E – przekrój nr 5

Fig. 8. Changes of suspended sediment concentra-
tion (C_s) in particular cross-sections of the
Obra river bed

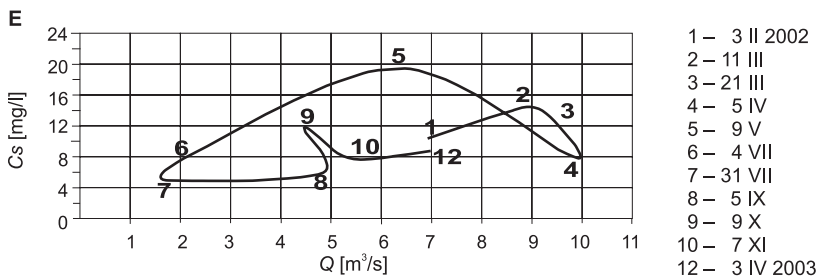
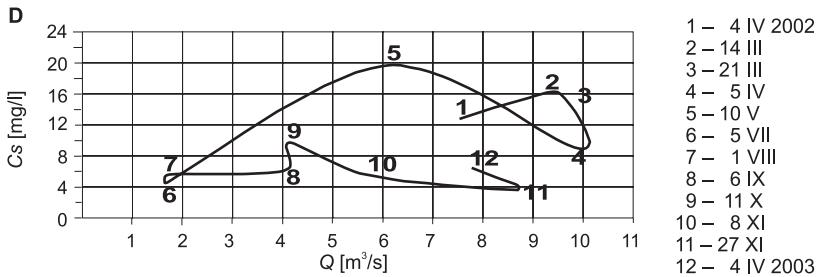
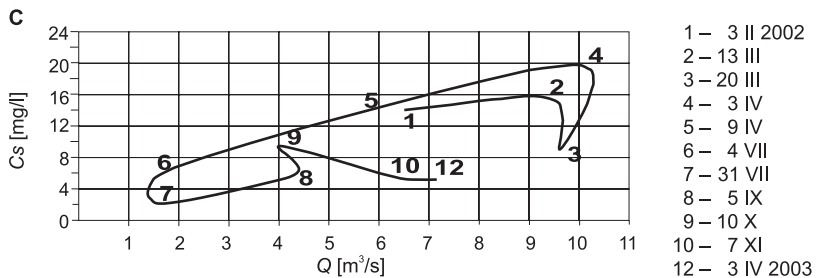
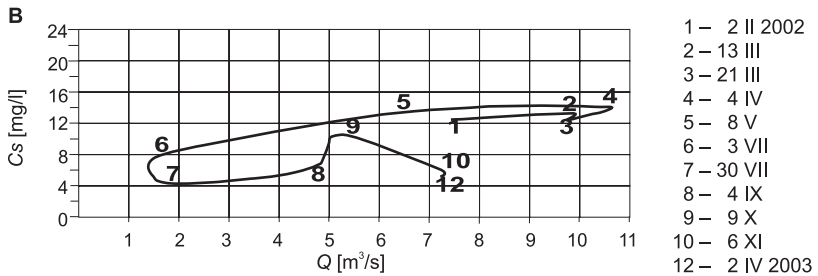
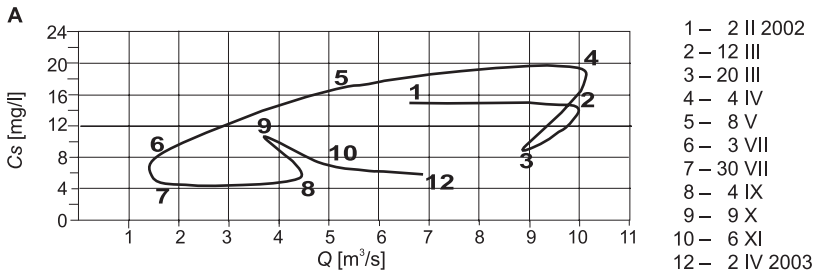
A – cross-section 1, B – cross-section 2, C – cross-sec-
tion 3, D – cross-section 4, E – cross-section 5

Rys. 9. Zależność pomiędzy przepływem (Q)
a koncentracją zawiesiny (C_s) w przekrojach po-
przecznych koryta Obry w okresie 2 II 2002 –
4 IV 2003

A – przekrój nr 1, B – przekrój nr 2, C – przekrój nr 3,
D – przekrój nr 4, E – przekrój nr 5

Fig. 9. Relation between discharge (Q) and sus-
pended sediment concentration (C_s) in particu-
lar cross-sections of the Obra river bed (2 II 2002
– 4 IV 2003)

A – cross-section 1, B – cross-section 2, C – cross-sec-
tion 3, D – cross-section 4, E – cross-section 5





Fot. 1. Brzeg wklęsły w sąsiedztwie przekroju nr 1 ulegający intensywnemu podcinaniu
Pic. 1. Concave bank of the Obra river in the neighbourhood of cross-section 1 subjected to intensive lateral erosion

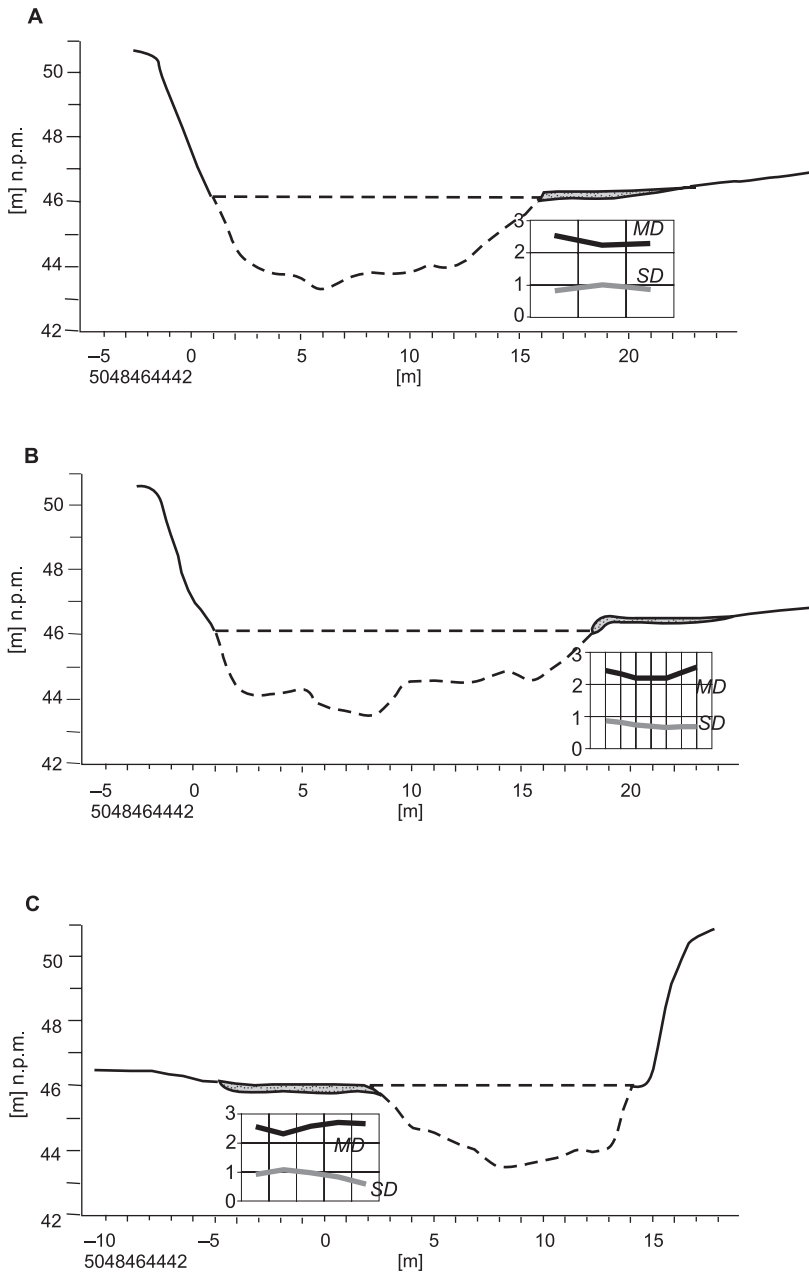


Fot. 2. Ślady osunięć osadów na wysokim brzegu wklęsłym w sąsiedztwie przekroju nr 3
Pic. 2. Traces of landslides on high concave bank of the Obra river in the neighbourhood of cross-section 3



Fot. 3 i 4. Fragment strefy brzegowej koryta w pobliżu przekroju nr 1 z osadem zakumulowanym podczas wezbrania w marcu 2002 r.

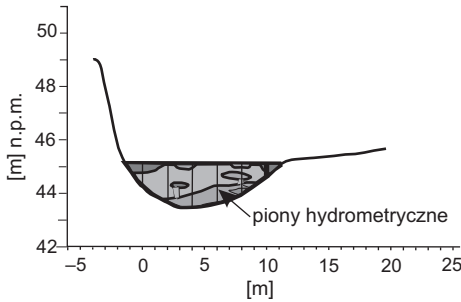
Pic. 3 and 4. Sediments accumulated during high water stages period (March 2002) on fragment of bank zone of the Obra river bed in the neighbourhood of cross-section 1



Rys. 10. Zmienność uziarnienia osadu zdeponowanego na równinie zalewowej podczas wezbrania
 A – przekrój nr 1 (8 V 2002), B – przekrój nr 2 (8 V 2002), C – przekrój nr 3 (9 V 2002)

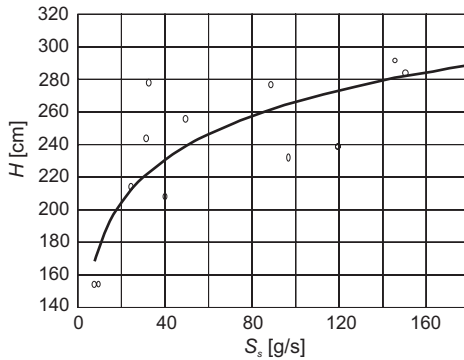
Fig. 10. Changes of granulation of sediments deposited on floodplain during high water stages period

A – cross-section 1 (8 V 2002), B – cross-section 2 (8 V 2002), C – cross-section 3 (9 V 2002)



Rys. 11. Rozkład koncentracji zawiesiny w przekroju pomiarowym

Fig. 11. Distribution of suspended sediment concentration in across-section



Rys. 12. Kształt zależności między ładunkiem zawiesiny (S_s) a stanem wody (H)

Fig. 12. Relation between suspended load (S_s) and water stage (H)

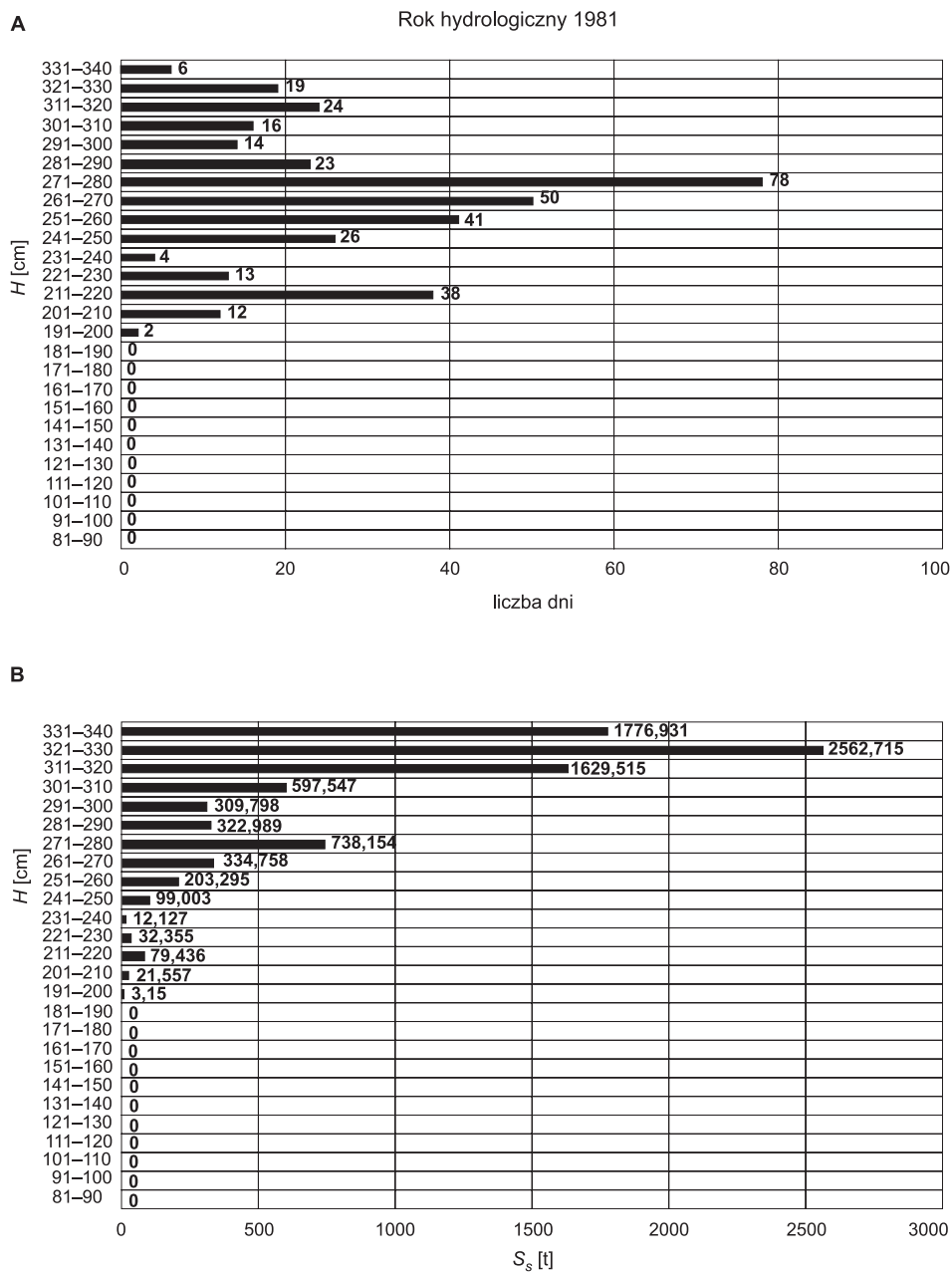
wód wezbraniowych dokonano poboru prób świeżo zdeponowanego osadu (na przekroju nr 1, 2 i 3, gdzie materiał ten zajmował największą powierzchnię). Na pierwszym przekroju pomiarowym osad ten charakteryzował się wskaźnikiem średniej średnicy ziarna (MD) w przedziale od 2,3 phi do 2,5 phi (rys. 10A). Wartość ta nieznacznie zmniejszała się wraz ze wzrostem odległości od koryta. Pojawieniu się nieco grubszych frakcji osadu towarzyszył spadek stopnia wysortowania ($SD = 0,8-1,1$). Kolejny z analizowanych przekrojów (nr 2) cechował nieco większe zróżnicowanie zdepono-

wanego materiału (wskaźnik MD wyniósł od 2,2 phi w odległości 2 m od koryta do 2,7 phi w odległości 5 m od koryta Obry) (rys. 10B). Stopień wysortowania osadów nie zmienił się w istotny sposób ($SD = 0,7-0,9$).

W przypadku trzeciego przekroju pomiarowego średnia średnica ziarna wahała się od 2,3 do 2,75 phi (rys. 10C). Najdrobniejszy materiał został zdeponowany bezpośrednio przy korycie rzeczonym, a nieco grubszy w odległości 4 m od niego. Podobnie jak w przekroju nr 1 materiał o niższym wskaźniku MD charakteryzowało słabsze wysortowanie ($SD = 0,6-1,2$). Parametr odchylenia standardowego wzrastał wraz z oddalaniem się od brzegu koryta.

ODPŁYW ZAWIESINY W LATACH 1971-1991

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów oraz danych hydrologicznych z posterunku wodowskazowego Międzyrzecz obliczono wielkość odpływu zawiesiny w latach 1971-1991. Zasięg czasowy dokonanych obliczeń był ograniczony ze względu na likwidację wodowskazu w kwietniu 1992 r. Dodatkowym utrudnieniem był brak krzywej konsumpcyjnej dla posterunku w Międzyrzeczu. Skorzystanie z danych hydrologicznych z posterunków wodowskazowych w Bledzewie i Zbąszyniu było niemożliwe ze względu na obecność zapory wodnej w Bledzewie oraz sztucznie wyznaczone stałe piętrzenia przy wypływie Obry z Jeziora Zbąszyńskiego. Wielkość odpływu zawiesiny w wyżej wymienionym okresie obliczono w następujący sposób. Dla każdej z serii pomiarowych, na podstawie koncentracji zawiesiny w pionach hydrometrycznych, obliczono średnie koncentracje zawiesiny w badanych przekrojach poprzecznych (rys. 11).

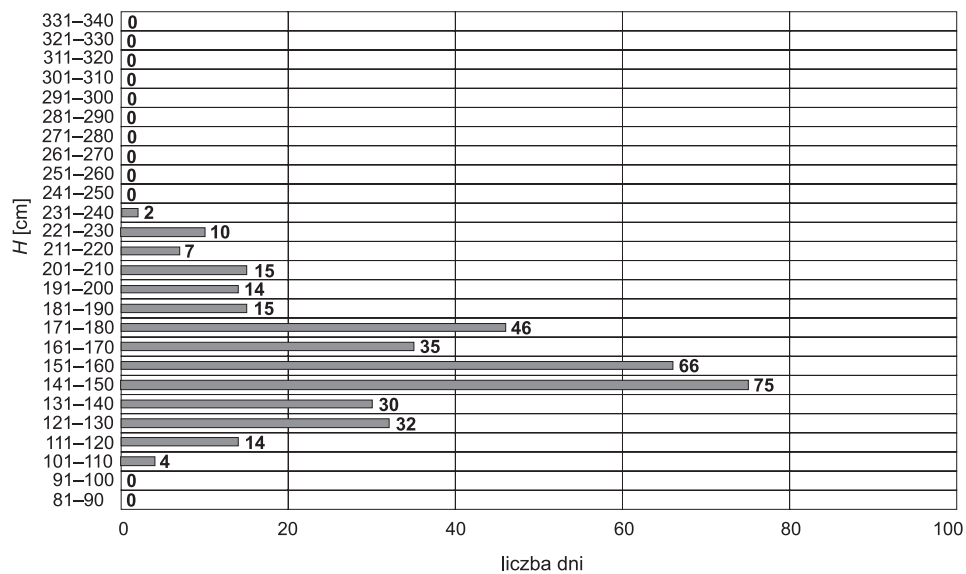


Rys. 13. Częstość występowania stanów wody (H) oraz ładunek materiału zawieszonoego (S_s) w roku hydrologicznym wilgotnym (A, B) i suchym (C, D)

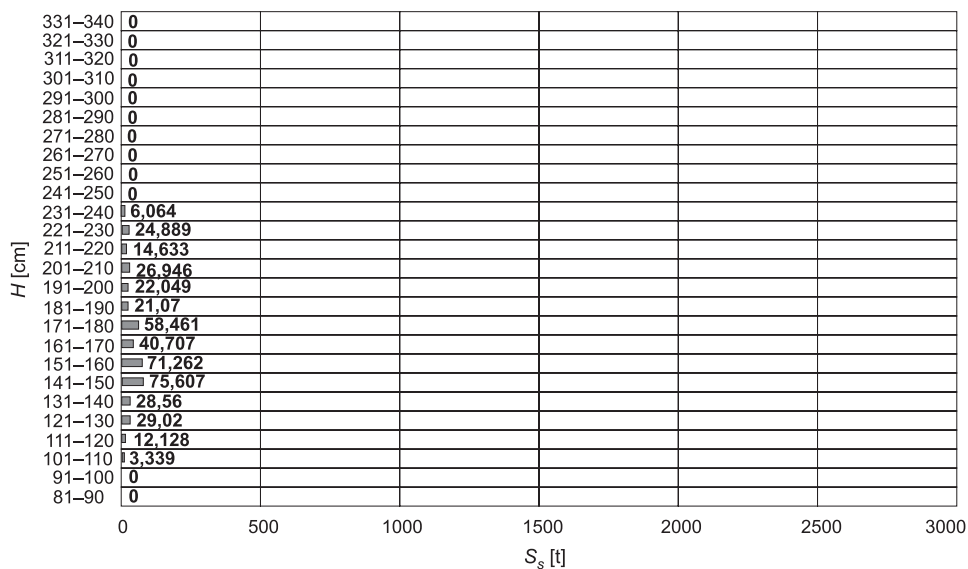
Fig. 13. Frequency of water stages (H) and the amount of suspended sediment transport (S_s) in chosen wet (A, B) and dry (C, D) hydrologic year

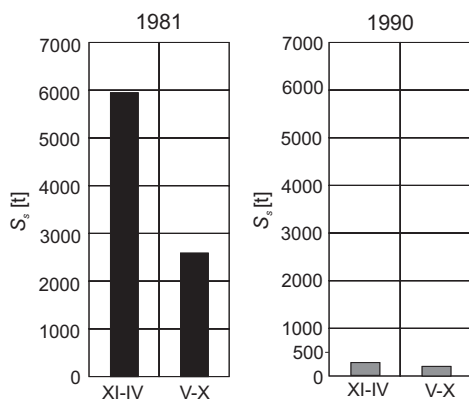
C

Rok hydrologiczny 1990



D





Rys. 14. Odpływ zawiesiny (S_s) w miesiącach półrocza zimowego (XI-IV) i letniego (V-X) w roku wilgotnym (1981) i suchym (1990)

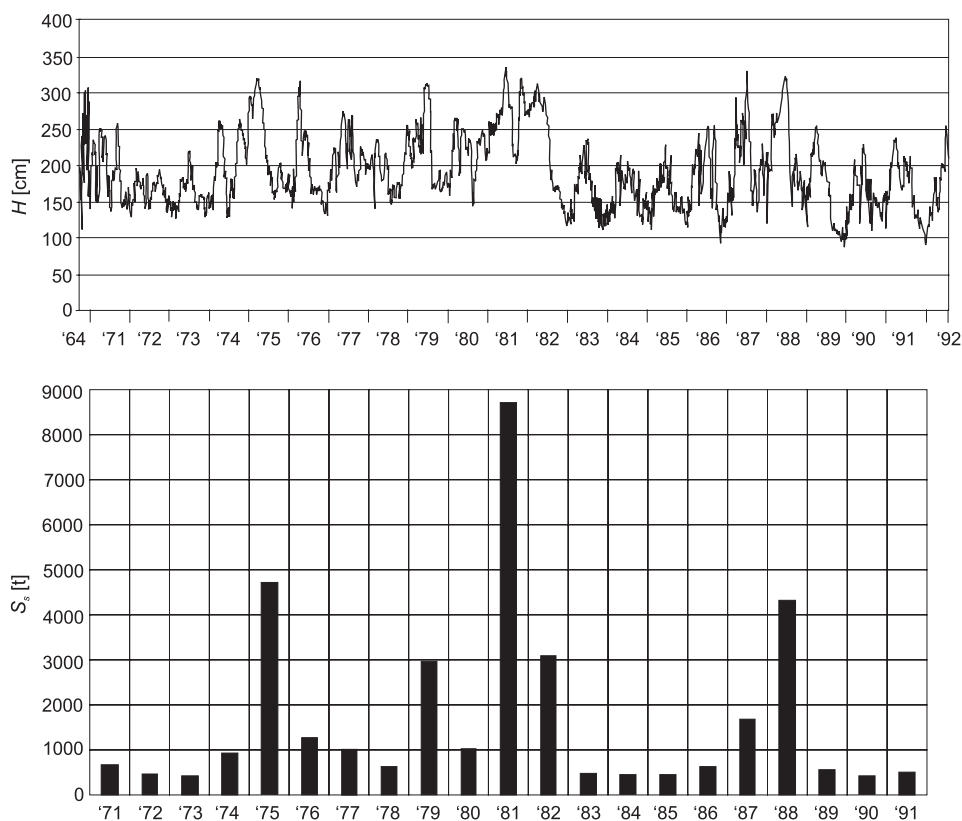
Fig. 14. Amount of suspended load during winter (XI-IV) and summer (V-X) months in wet (1981) and dry (1990) hydrological year

Następnie, mając do dyspozycji wartości średnich koncentracji zawiesiny oraz objętości przepływu, obliczono wielkość ładunku materiału zawieszono transportowanego przez przekrój w jednostce czasu [g/s]. Na tej podstawie wyznaczono kształt zależności pomiędzy ładunkiem transportowanego materiału a stanem wody (rys. 12). Kształt tej zależności obliczono dla przekroju nr 4. Przyczynami takiego wyboru były największa ilość danych pomiarowych (12 serii) oraz symetryczny kształt przekroju. Następnie obliczono wielkość odpływu zawiesiny dla okresu 1971–1991, szczególną uwagę poświęcając wybranym latom wilgotnym (1981) i suchym (1990) (rys. 13A–D).

W roku wilgotnym (1981) wielkość odpływu zawiesiny wyniosła 8723.419 t. Wpływ miał tutaj przede wszystkim długi okres występowania wysokich stanów wody. W przedziale 271–280 cm utrzymywały się one łącznie przez 78 dni (rys. 13A). W tym czasie transport zawiesiny wyniósł ponad 680 t (rys. 13B). Duże znaczenie miały stany wezbra-

niowe, które mimo niższej frekwencji występowania charakteryzowały się wysokimi wartościami natężenia transportu. Stany wody utrzymywały się na poziomie 311–320 i 321–330 cm łącznie przez 43 dni (rys. 13A). Wielkość odpływu zawiesiny wyniosła w tym czasie powyżej 800 t (rys. 13B). Na wielkość transportu wpłynęły nie tylko warunki hydrauliczne w korycie, ale także możliwość dostawy zawiesiny do koryta, uwarunkowana głównie rozkładem i intensywnością opadów, wilgotnością gruntu i stopniem rozwoju szaty roślinnej (FROEHLICH 1982; KOSTRZEWSKI, MAZUREK 1995). Możliwości te były szczególnie duże podczas silnych wezbrań powodziowych w opisywanym roku wilgotnym (marzec i sierpień 1981 r.). Odpływ zawiesiny w roku suchym (1990) wyniósł 442.748 t. O niskiej wartości transportu decydowały warunki hydrauliczne panujące w korycie (maksymalne zanotowane w tym roku stany wody sięgnęły zaledwie 240 cm) (rys. 13C i D). Jakość tych warunków była efektem określonych czynników klimatycznych (opady atmosferyczne).

Dla roku suchego i wilgotnego dokonano porównania wielkości transportu zawiesiny w miesiącach półrocza letniego i zimowego (rys. 14). Zaznacza się tu przewaga odpływu zawiesiny w okresie od listopada do kwietnia. Wynika to ze wzmożonych procesów spływu powierzchniowego, braku aktywności wegetacyjnej oraz warunków meteorologicznych i hydrologicznych występujących w okresie zimowym (KOSTRZEWSKI i in. 1994). W przypadku roku suchego przewaga wielkości transportu zawiesiny w półroczu zimowym jest bardzo niewielka (rys. 14). W opisywanym roku hydrologicznym 1990, charakteryzującym się wyjątkowo niskimi stanami wody (również w okresie od listopada do kwietnia), aktywność procesów



Rys. 15. Odptyw zawiesiny w latach hydrologicznych 1971–1991 na tle wahań stanów wody
 Fig. 15. Amount of suspended load and changes of water stages in hydrological years 1971–1991

wpływających na dostawę zawiesiny do koryta kształtowała się na niskim poziomie.

Na rys. 15 przedstawiono zmiany w wielkości odptywu zawiesiny w okresie 1971–1991. Największe ładunki zawiesiny zostały odprowadzone w latach 1975, 1981 i 1988, a najniższe w latach 1972–1973, 1983–1985 oraz 1989–1991. Można zauważyć, że różnice w wielkościach odprowadzanego ładunku zawiesiny w latach wilgotnych i suchych są bardzo duże (rys. 15). Przyczyną występowania tak znacznych różnic mogło być uruchomienie źródeł dostawy osadów z obszaru równiny zalewowej oraz

ze środowiska stokowego w czasie wezbrań w latach wilgotnych. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że wezbrania pojawiające się w latach 1975, 1981 i 1988 były silniejsze od zaobserwowanego w okresie objętym pomiarami (marzec 2002 r.). W czasie ich trwania stany wody znacznie przekraczały 300 cm, podczas gdy w marcu 2002 r. maksymalny zaobserwowany stan wody wyniósł 292 cm. Natomiast w okresach lat suchych (wyżej wymienionych) ze względu na długotrwałe stany niskie transportowana zawiesina pochodziła głównie z koryta rzecznego. Obliczenie wielkości ładunku zawiesiny dla lat na-

stępnym było niemożliwe ze względu na likwidację wodowskazu w Międzyrzeczu (1992).

WNIOSKI

Obliczone wartości wielkości odpływu zawiesiny, średniej koncentracji materiału zawieszonego oraz kształt zależności pomiędzy tą wartością a objętością przepływu w poszczególnych przekrojach pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Analiza związku pomiędzy średnią koncentracją materiału zawieszzonego a objętością przepływu umożliwiła wstępne określenie sposobu dostawy materiału do koryta rzecznej. W przekrojach nr 1, 2 i 3 zawiesina była dostarczana z bardziej odległych źródeł dostawy, a przede wszystkim ze środowiska stokowego. Ważną rolę mogło tu pełnić odsłonięcie osadów glacialnych i fluwio-glacialnych w wysokim brzegu wklęsłym w pobliżu pierwszego przekroju pomiarowego (fot. 1). Ślady osunięć materiału stokowego były także widoczne w sąsiedztwie profilu nr 3 (fot. 2). Z kolei w przekrojach nr 4 i 5 normalne pętle histerezy świadczą o autochtonicznym pochodzeniu transportowanego osadu (głównie z dna koryta oraz ze strefy brzegowej).

2. Depozycja osadu powodziowego na części równiny zalewowej podczas wezbrania świadczy o aktywności procesu jej pionowego przyrostu. Można przypuszczać, że przy silniejszych wezbraniach akumulacja mogła obejmować niemal całe dno doliny na badanym odcinku. Podczas największych zanotowanych powodzi w 20-leciu 1971–1991 stan wody na wodowskazu Międzyrzecz sięgał 340 cm. Biorąc pod uwagę najwyższy stan wody w okresie objętym pomiarami (292 cm), poziom wody wyższy

o ok. 0,5 metra spowodowałyby zatopienie większej części równiny zalewowej badanego fragmentu doliny Obry, co spowodowałyby zarówno proces akumulacji, jak i uruchomienie bardziej odległych źródeł dostawy zawiesiny.

3. Zaobserwowany proces depozycji osadów na fragmencie równiny zalewowej podczas wezbrania ilustruje mechanizm tworzenia się litofacji środowiska pozakorytowego. Zdeponowaną warstwę osadu można przyporządkować w części do litofacji osadów powodziowych VA, wyróżnionej przez ROTNICKIEGO i MEYNARCYKĄ (1989) (akumulacja najdrobniejszych stwierdzonych osadów o wskaźniku $MD = 2,5-2,7 \phi$), a częściowo do litofacji osadów górnej części odsypu meandrowego PBT (ROTNICKI, MEYNARCYK 1989) (materiał o wskaźniku $MD = 2,2-2,5 \phi$ z większym udziałem frakcji 0,25–0,5 mm), związanej ze stanami okołopełnokorytowymi i akumulacją materiału na powierzchni wałów brzegowych. W nazewnictwie wyżej wymienionych litofacji wzorowano się na opracowaniu dotyczącym zmienności litologicznej osadów dna doliny Proсны (ROTNICKI, MEYNARCYK 1989).

4. Poznanie współcześnie zachodzących procesów depozycji materiału zawieszzonego na powierzchni równiny zalewowej pozwala przybliżyć warunki, w jakich kształtowały się osady pozakorytowe w przeszłości. Należy jednak pamiętać, że działalność człowieka, przejawiająca się w rolniczym użytkowaniu gruntów, wiążące się z nią zmiany w strukturze tego użytkowania oraz wprowadzanie zanieczyszczeń antropogenicznych wpłynęły na ilość i rodzaj materiału dostarczanego w obręb doliny rzecznej.

5. Wielkość odpływu zawiesiny wyniosła dla roku wilgotnego 8723.419 t, a dla roku suchego 434.737 t. Czynnikiem decydującym o wartości transportu była

częstość występowania wysokich stanów wody, które wpływały na warunki hydrauliczne w korycie rzeczonym. Znaczenie miały także stany wezbraniowe (znacznie przekraczające 300 cm), w czasie których zwiększone były możliwości dostawy zawiesiny do koryta z obszaru równiny zalewowej oraz ze środowiska stokowego. Zanotowano przewagę odpływu zawiesiny w miesiącach półrocza zimowego, co jest rezultatem silniejszego oddziaływania procesów denudacyjnych w tym okresie.

LITERATURA

- ALLEN J.R.L., 2000: Procesy kształtujące powierzchnię Ziemi. PWN, Warszawa.
- BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E., MAGNUSZEWSKI A., MIKULSKI Z., 1993: Hydrometria. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E., 2002: Obieg materii w systemach rzeczno-jeziornych. Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Warszawa.
- BARTKOWSKI T., 1956: Z zagadnień geomorfologicznych doliny Międzyrzecza. *Bad. Fizj. nad Pol. Zach.*, t. III, PTPN, Poznań, 1–61.
- BARTKOWSKI T., 1957: Rozwój polodowcowej sieci hydrograficznej w Wielkopolsce Środkowej. *Zeszyty Naukowe UAM, Geografia*, 1, Poznań.
- BRĄŃSKI J., 1968: Określanie koncentracji zawiesiny bezpośrednią metodą wagową przy użyciu sączków. *Prace PIHiM*, Warszawa.
- BYCZKOWSKI A., 1999: *Hydrologia*, t. II. Wyd. SGGW, Warszawa.
- CHOIŃSKI A., 1988: Zróżnicowanie i uwarunkowania zmienności przepływów rzek polskich. *Wyd. Nauk. UAM, Poznań*, 1–99.
- CHOIŃSKI A., KANIECKI A., KRAJNIAK J., ŻURAWSKI M. (red.), 1979: *Wody gminy Międzyrzecz*. Poznań–Międzyrzecz.
- CIGIZOGLU H.K., 2004: Estimation and forecasting of daily suspended sediment data by multi-layer perceptrons. *Advances in Water Resources*, 27, 185–195.
- Delft Hydraulic Laboratory, 2005: <http://www.wldelft.nl/inst/sed/ustm/inex.html>.
- DYNOWSKA J., 1971: Typy reżimów rzecznych w Polsce. *Zesz. Nauk. UJ, CCXVIII, Prace Geogr.*, 28, Prace IG, 50.
- FROELICH W., 1975: Dynamika transportu fluwialnego Kamienicy Nowojowskiej. *Prace Geogr. PAN*, 114, Warszawa.
- FROELICH W., 1982: Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwierzdelin w górskiej zlewni fliszowej. *Prace Geogr. IGiPZ PAN*, 143.
- GUTRY-KORYCKA M., 2001: Geograficzne uwarunkowania ustroju rzek. Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Warszawa.
- JIONGXIN Xu, 1999: Grain size characteristics of suspended sediment in the Yellow River, China. *Catena*, 38, 243–263.
- KLEINHANS M.G., TEN BRINKE W.B.M., 2001: Accuracy of cross-channel sampled sediment transport in large sand-gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127, 4, 258–269.
- KOSTRZEWSKI A., MAZUREK M., ZWOLIŃSKI Z., 1994: Dynamika transportu fluwialnego górnej Parsęty jako odbicie funkcjonowania systemu zlewni. *Stow. Geomorfologów Polskich*, Poznań.
- KOSTRZEWSKI A., MAZUREK M., 1995: Zmienność koncentracji i ładunku materiału rozpuszczonego i zawieszzonego w zlewni górnej Parsęty w roku hydrologicznym 1989. *Sprawozdania PTPN*, 109, cz. 1.
- KOWALSKA A., 1960: Paleomorfologia powierzchni podplejstocenijskiej niżowej części dorzecza Odry. *Instytut Geografii PAN, Prace Geograficzne PAN*, 21, 7–75.
- KRYGOWSKI B., 1961: Geografia fizyczna Niziny Wielkopolskiej. Cz. I: Geomorfologia. PTPN, Wyd. Mat.-Przyr., Kom. Fizjogr., Poznań.
- LENZI M.A., MARCHI L., 2000: Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena*, 39, 267–282.
- Mapa topograficzna 1:25 000, arkusz Meseritz: „Königliche Preussische Landes-Aufnahme 1893. Herausgegeben 1895”. Biblioteka Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu.
- MOJSKI E., 1976: Mapa geologiczna polski. Skala 1:200 000. Mapa utworów powierzchniowych – mapa podstawowa 1:50 000. Arkusz Świebodzin. *PIG*, Warszawa.
- PIHM, 1970: Wytyczne do wykonywania i opracowania pomiarów przepływu metodą rachunkową. *Opr. J. Golek. Instrukcje i podręczniki*, 88.
- QING CHAO GUO, YEE-CHUNG Jin, 2002: Modeling non-uniform suspended sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 9, 839–848.

- ROTNICKI K., MEYNARCYK Z., 1989: Późnovistuliańskie i holocenijskie formy i osady korytowej Prosnicy i ich paleohydrologiczna interpretacja, *Seria Geografia*, 43, Uniwersytet im. A. Mickiewicza, Poznań.
- SEEGER M., ERREA M.P., BEGUERIA S., ARNAEZ J., MARTI C., GARCIA-RUIZ J.M., 2004: Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteric loops in a small water catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 288, 299–311.
- SUKHODOLOV A., ENGELHARDT C., KRÜGER A., BUNGARTZ H., 2004: Case study: Turbulent flow and sediment distributions in a groyne field. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130, 1, 1–9.
- TOMASZEWSKI E., 1967: Geomorfologia i geneza doliny Obry. UAM, Prace Wydziału Biologii i Nauk o Ziemi, Ser. Geografia, 3, Poznań.
- WINNICKI J., 1977: *Objaśnienia do mapy geologicznej Polski*. Arkusz Świebodzin (red. Mojski J.E.). Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- XIAOYU LI, TINGWU LEI, WEI WANG, QICHUAN XU, JUN ZHAO, 2005: Capacitance sensors for measuring suspended sediment concentrations. *Catena*, 60, 227–237.
- ZENG W., BECK B.W., 2003: STAND, a dynamic model for sediment transport and water quality. *Journal of Hydrology*, 277, 125–133.

Recenzent: prof. UAM dr hab. Leszek Kasprzak

*Institut Paleogeografii i Geoekologii,
Centrum Turystyki i Rekreacji
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu*

CHANGES OF INTENSITY OF SUSPENDED LOAD TRANSPORT IN THE LOWER COURSE OF THE OBRA RIVER NEAR MIĘDZYRZECZ (WESTERN POLAND)

Summary

Research concerning changes of intensity of suspended load transport was done in the lower course of the Obra river near Międzyrzecz (Western Poland). Hydrological measurements were realized within 1 km long and 70–150 m wide section of the Obra river valley, which is situated about 3 km north-west of Międzyrzecz. Detailed analysis of relation between suspended sediment concentration and discharge afforded possibility for preliminary determining the way of suspended sediment supply to the river bed during high water stages. It was supposed that exposures of glacial and fluvioglacial sediments in high concave banks could be an important factor influencing the amount of delivery of suspended material. On the other hand, normal hysteric loops (oriented clockwise) were observed in cross-sections 4 and 5. That fact would suggest that transported material originates

from the Obra river bed or its nearest neighborhood. Besides, the process of sediment accretion was observed on the fragment of drowned floodplain during high water stages. This investigation allowed to illustrate the mechanism of forming floodplain sediments both at present and in the past. The problem of changes of amount of suspended load in longer time periods also was discussed. On the basis of measurement data and hydrological data from Międzyrzecz water-gauge, annual amount of suspended load was calculated for years 1971–1991. The main factor, which influenced the amount of sediment transport, was frequency of high water stages and hydraulic conditions of flow in the river bed. Flood events also were very important because of increased possibilities of suspended sediment supply from floodplain and steep bank slopes.