

# Określenie zmian morfologicznych koryta Wisły powyżej Warszawy w oparciu o lotnicze zobrazowanie terenu metodą wideo-komputerową

*Determination of morphological changes of Vistula River bed upstream Warsaw on the base of airborne video-computer imagery*

Andrzej DOBROWOLSKI, Barbara GŁOWACKA,  
Jolanta KRUPA-MARCHLEWSKA

Airborne video imagery of river bed is one of the methods of quick terrain information acquisition. In consequence of this, the operational method of river bed morphological changes assessment has been evaluated in Water Resources Department. This method is based on application of airborne video-computer imagery of river bed and riverside land in connection with GPS as well as field measurements. Computer processing with geometric and radiometric correction of video frames allows to obtain color river photomaps. They are synoptic river bed images with shoreline, bedforms and hydraulic structures.

Flood waters with their big flow dynamics play decisive role in river bed formation. The intensive morphological river bed changes are observed on the Middle Vistula River stretch — mainly because of highly positive bed load balance.

Images of river bed forms configuration in period 1991–2000

have been analysed. Some significant rainfall floods took place in this period, especially after 1997. They have distinctly changed bed forms configuration, current shifting, erosion and sediment zones.

Morphological changes analysis affords possibilities for:

- assessment of the river bed state and variability,
- assessment of bankful flow conditions,
- location of potential ice-jam risk places,
- assessment of: water gauging stations, water intakes and outlets functioning,
- choice of measurement cross-sections and river stretches in agreement with hydrometric rules,
- operational assessment of flood hazard,
- assessment of flooded area state in river valley.

## Wstęp

Rezultaty dotychczasowych badań teledetekcyjnych zmian morfologicznych koryta rzeczno, prowadzonych w Ośrodku Zasobów Wodnych IMGW, wzbogacają wiedzę o mechanizmie przeobrażeń koryt rzecznych. Wyniki tych badań wskazują na dużą dynamikę zmian koryta Wisły Środkowej, szczególnie w rejonie Warszawy.

Wisła w rejonie Warszawy jest dobrym obiektem badań współczesnych procesów morfologicznych zachodzących zarówno pod wpływem czynników hydrologicznych, jak i antropogenicznych (regulacja rzeki, pobór kruszywa). Zmiany te dotyczą transportu rumowiska rzeczno, tworzenia, przemieszczania i przekształca-

nia utworów korytowych, ukształtowania dna rzeki, które od dziesiątek lat ulega pogłębianiu w obrębie aglomeracji miejskiej, jak również brzegów pod wpływem intensywnej erozji bocznej związanej ze zmianami nurtu.

## Metodyka

Metodyka badań opiera się na lotniczym obrazowaniu koryta rzeki techniką wideo z ciągłą rejestracją obrazu na twardym dysku komputera. Rejestrowany obraz wideo może być znakowany geopozycyjnym sygnałem GPS (*Raporty roczne...*, 1991–2000).

Odbiornik GPS umieszczony na pokładzie samolotu jest połączony zarówno z komputerem, jak i z ka-

merą. Umożliwia to jednocześnie śledzenie trajektorii lotu (nawigacja samolotu), jej późniejsze wydrukowanie na podkładzie mapowym oraz znakowanie sygnałem GPS kadrów wideo bezpośrednio na taśmie magnetowidowej. Przyporządkowanie tak oznakowanych kadrów do momentów pomiaru położenia samolotu techniką GPS ułatwia odniesienie ich do jednolitego układu współrzędnych geograficznych.

Zastosowanie na pokładzie samolotu wysokiej klasy komputera PC umożliwia zapis kadrów na matrycy dyskowej w sposób ciągły.

Tak zarejestrowane obrazy poddaje się korekcji geometrycznej i radiometrycznej. Komputerowe opracowanie znakowanych sygnałem GPS obrazów wideo pozwala na uzyskanie barwnych fotomap długich odcinków rzek. Te fotomapy stanowią obraz aktualnego stanu rzeki, wraz z linią brzegową, utworami korytowych łącznie z częściami zanurzonymi (do głębokości granicznej, uwarunkowanej przezroczystością wody w czasie rejestracji obrazu), budowlami hydrotechnicznymi oraz terenami przybrzeżnymi. Jak wykazała praktyka, pozwalają one na aktualizację materiałów kartograficznych, które zwykle powstają w cyklu wieloletnim, a w związku z tym mogą nie zawierać aktualnej informacji o terenie.

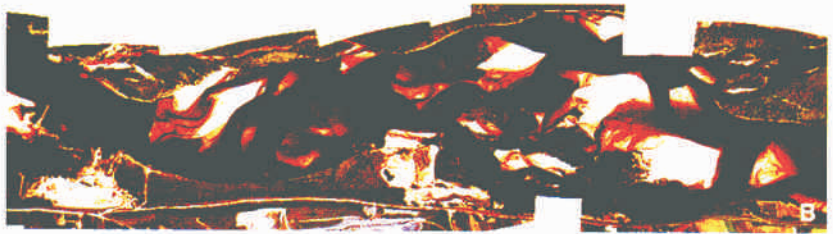
Okresowe powtarzanie obrazowania lotniczego pozwala na zarejestrowanie zmian morfologicznych koryta rzeczno, kształtowanych głównie przez przepływy wielkich wód — ze śladami wód średnich, niskich, a także z sukcesją roślinną, utrwalającą stopniowo ruchome formy korytowe.

Na Wiśle Środkowej, ze względu na znaczną intensywność procesów morfologicznych, porównanie obrazów zarejestrowanych w rocznych odstępach czasu pozwala na określenie przemieszczania się i transformacji utworów korytowych (łącznie z oceną szybkości przemieszczania), a także zmian układu nurtu.

### Charakterystyka odcinków badawczych

Aby przyrzeć się bliżej mechanizmowi zmian morfologicznych koryta Wisły, na obszarze lotniczego obrazowania wydzielono odcinek rzeki o długości ok. 26 km, położony pomiędzy km 492 i km 518, o dużą zmienności i różnorodności form korytowych. W rejonie Warszawy można wyróżnić trzy odcinki Wisły o zróżnicowanym charakterze morfologicznym, a mianowicie:

1) Odcinek pomiędzy 492 i 500 km, charakteryzujący się szeroką doliną zalewową (prawy brzeg) i szerokim korytem, w którym zachodzą intensywne zmiany form korytowych i brzegów (ryc. 1A);



Ryc. 1. Obraz koryta Wisły poniżej Warszawy (IX 2000 r.) na: A – odcinku nieuregulowanym „1”, B – odcinku przejściowym „2”.

Fig. 1. The image of Vistula River bed upstream Warsaw (09.2000), A – unregulated stretch „1”, B – transitional stretch „2”.

2) Odcinek pomiędzy 500 i 509 km rzeki, przejściowy pomiędzy odcinkiem „1” a tzw. gorsetem warszawskim (ryc. 1B);

3) Odcinek uregulowany, o bardzo zawężonym korycie wielkich i średnich wód w stosunku do dwóch poprzednich, tzw. gorset warszawski – zaczynający się od km 509. Odcinek w dużym stopniu poddany antropopresji, stanowiący element organizmu miejskiego.

W celu scharakteryzowania różnic w dynamice przepływu wielkich wód dla trzech wymienionych odcinków wyznaczono parametry geometryczne i hydrauliczne koryta w czasie kulminacji fali wezbraniowej, jaka przemieściła się przez odcinek warszawski Wisły w dniu 14 lipca 1997 roku.

Obliczenia przeprowadzono w czterech profilach położonych w:

- km 492,6 i 494,0 na terenie odcinka specjalnego w rejonie Ciszycy — profile reprezentujące Wisłę powyżej Warszawy (odcinek „1”),
- km 503,4 — w rejonie wodowskazu Warszawa-Nadwilanówka, reprezentujący odcinek przejściowy rzeki (odcinek „2”),
- km 513,3 — w rejonie wodowskazu Warszawa Port Praski reprezentatywny dla tzw. gorsetu warszawskiego (odcinek „3”).

Parametry geometryczne i charakterystyki hydrauliczne koryta, spadek zwierciadła wody, natężenie przepływu i wyznaczone współczynniki szorstkości  $n$  wg Maninga w 4 profilach na badanym odcinku Wisły zamieszczono w tabeli 1.

Zestawienie wykazuje znaczne zróżnicowanie parametrów. W obrębie „gorsetu warszawskiego” pole przekroju poprzecznego zmniejsza się prawie dwukrotnie, szerokość koryta wielkich wód zmniejsza się prawie 4-krotnie, głębokość średnia — zwiększa się ponad 2-krotnie, prędkość średnia — zwiększa się również 2-krotnie.



Tabela 1. Parametry hydrauliczne badanych odcinków Wisły Środkowej  
*Hydraulic parameters of investigative stretches of Middle Vistula River*

Lp.	Parametry rzeki <i>River parameters</i>	Odcinek badawczy w rejonie Ciszycy <i>Stretches near Ciszycza</i>		Wodowskaz Nadwilanówka <i>Gauging station Nadwilanówka</i>	Wodowskaz W-wa Port Praski <i>Gauging station Praski Port</i>
		km 492,6	km 494,0	km 503,4	km 513,3
1	Rzędna zwierciadła wody [m npm. Kr.] <i>Water level</i>	87,33	86,94	84,95	82,56
2	Natężenie przepływu $Q$ [m <sup>3</sup> /s] <i>Water discharge</i>	5150	5150	5150	5150
3	Pole przekroju $A$ [m <sup>2</sup> ] <i>Cross-section area</i>	3972	4410	3283	2192
4	Szerokość zwierciadła wody $B$ [m] <i>Width</i>	1470	1680	1020	400
5	Głębokość średnia $t_m$ [m] <i>Mean depth</i>	2,70	2,65	3,22	5,48
6	Prędkość średnia $V_m$ [m/s] <i>Mean velocity</i>	1,30	1,17	1,57	2,35
7	Promień hydrauliczny $R_h$ [m] <i>Hydraulic radius</i>	2,70	2,65	3,22	5,48
8	Spadek zw. wody $I$ [‰] <i>Surface slope</i>	0,29	0,29	0,26	0,24
9	Współczynnik szorstkości $n$ <i>Roughness</i>	0,025	0,028	0,022	0,021

Mimo tak zróżnicowanej morfologii koryta i dużej zmienności charakterystyk hydraulicznych przepływu, spadki zwierciadła wody w czasie przejścia kulminacji wielkich wód na krótkich odcinkach są mało zróżnicowane. Wynika to stąd, że są one kształtowane przez warunki hydrauliczne przepływu na stosunkowo długich odcinkach rzeki; w odróżnieniu od sytuacji panującej przy średnich i niskich przepływach, kiedy to obserwuje się znaczne zmiany spadków zw. wody na krótkich odcinkach rzeki, w zależności od ukształtowania koryta rzecznego, z dużym wpływem form korytowych.

### Siła poruszająca na warszawskim odcinku Wisły

Przyczyną przepływu wody i rumowiska w korycie rzeki jest składowa siła ciężenia w kierunku spływu, zwana siłą poruszającą. Wartość jej określił Dubuat (*Raporty roczne...*, 1991–2000) równaniem:

$$S = r \cdot g \cdot J \cdot t \text{ [N/m}^2\text{]}$$

gdzie:

- $r$  — gęstość wody [kg/m<sup>3</sup>],
- $g$  — przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>],
- $J$  — spadek dna cieku [‰],
- $t$  — głębokość w korycie [m].

Rezultaty obliczeń zamieszczono w tabeli 2.

Na badanym odcinku z biegiem rzeki zwiększają

się wartości siły poruszającej  $S$ , od średnio 7,6 powyżej Warszawy do 12,9 w centralnej części tzw. gorsetu warszawskiego. Ustalone wartości odnośnie do przepływu o natężeniu  $Q = 5150 \text{ m}^3/\text{s}$ , zbliżonego do wielkiej wody ( $WWQ$ ) i są bardzo wysokie.

Dla porównania — siła poruszająca  $S$  występująca w rzece przy średnim niskim przepływie ( $SNQ$ ) na silnie zawężonym odcinku Wisły, a więc maksymalna w rejonie Warszawy wynosi zaledwie  $2,44 \text{ N/m}^2$  i jest ponad 5-krotnie mniejsza od obliczonej dla  $WWQ$ .

Ocena zmian morfologicznych koryta Wisły Środkowej na przykładzie wybranych odcinków badawczych.

### Odcinek rzeki nieuregulowanej

Odcinek położony powyżej Warszawy między km 492 i 500 reprezentuje koryto rzeki dzikiej, anastomozującej (ryc. 1A).

Korzystając z materiałów obrazowych, rejestrowanych systematycznie z pokładu samolotu zestawiono na ryc. 2:

- obraz form korytowych w 1991 r., a więc w okresie suchym (który trwał do 1994 r.),
- obraz form korytowych w roku 2000.

Oba obrazy zarejestrowano przy podobnym stanie wody w Wiśle.

W okresie pomiędzy rejestracją obu obrazów miało miejsce kilkanaście wezbrań opadowych na Wiśle, szczególnie od roku 1997 (tab. 3).

Tabela 2. Wartości siły poruszającej w wybranych profilach Wisły  
*Sediment dislodging force in choosen Vistula cross-sections*

Lp.	Położenie profilu badawczego Cross-section location	Km	Siła poruszająca Dislodging force S [N/m <sup>2</sup> ]
1	Odcinek doświadczalny w rejonie Ciszycy <i>Stretch near Ciszycza</i>	492,6	7,68
2	jw. <i>Ciszycza region</i>	494,0	7,53
3	Wodowskaz Nadwilanówka <i>Gauging station Nadwilanówka</i>	503,4	8,21
4	Wodowskaz Port Praski <i>Gauging station Praski Port</i>	513,3	12,90

Wezbrania zmieniły wyraźnie układ piaszczystych form korytowych. Widoczne są dużo większe rozmiary łączne form korytowych. Jest to wynik zarówno większego dopływu do rzeki rumowiska ze zlewni na skutek opadów, jak i większego transportu rumowiska rzeką przez wody wielkie niż przez wody średnie i niskie, jakie występowały w okresie suchym.

Analiza obu ww. obrazów wskazuje na kilka prawidłowości:

— porośnięte roślinnością brzegi i części piaszczystych utworów korytowych nie uległy znaczącym zmianom;

— wokół utrwalonych roślinnością części łąch piaszczystych, zarówno środkowych (1a), jak i bocznych (1b) wielkie wody nanoszą rumowisko rzeczne i powstają nowe lub rozrastają się dotychczasowe formy korytowe. Utwory te mogą być przez następne wielkie wody rozmywane wzdłuż krawędzi (2a), w części centralnej (2b) lub czołowej (2c);

— zmiany układu form korytowych powodują zmiany położenia nurtu rzeki;

— w następstwie zmian nurtu mogą zmieniać się obszary erozji (3) i sedymentacji rumowiska rzeczne (4). Na przykład zanieśenie rumowiskiem obszaru przy prawym brzegu spowodowało silne zawężenie koryta w dolnej, w pewnym stopniu uregulowanej części odcinka.

#### Odcinek powyżej „gorsetu warszawskiego”

Odcinek od kilometra 501 do 509 jest odcinkiem przejściowym pomiędzy odcinkami o szerokiej dolinie zalewowej i szerokim, zmiennym korycie rzeki a odcinkiem uregulowanym o bardzo zawężonym korycie (ryc. 1B). Jest on częściowo uregulowany, poddany działalności człowieka (pobór kruszywa, zwalki ziemi i gruzu na terenach zalewowych).

Wielkie wody, których koryto zmniejsza swą szerokość blisko 2-krotnie (ale nie w sposób płynny), po-

Ryc. 2. Zmiany układu form korytowych na badanym odcinku Wisły Środkowej (km 491–494): 1a – porośnięte części łąch piaszczystych środkowych, 1b – porośnięte części łąch piaszczystych bocznych, 2a – rozmycia łąch na krawędziach, 2b – rozmycia łąch w częściach centralnych, 2c – rozmycia łąch w częściach czołowych, 3 – strefy erozji, 4 – strefy sedymentacji rumowiska rzeczne, 1, XVI – przekroje pomiarowe.

Fig. 2. River bed forms changes on the investigated Vistula stretch (km 491–494): 1a – overgrown parts of central sand bars, 1b – overgrown parts of lateral sand bars, 2a – bar-edges washing, 2b – bars washing in their central parts, 2c – bars washing in front part, 3 – erosion zones, 4 – sediment zones, 1, XVI – measurement cross-sections.

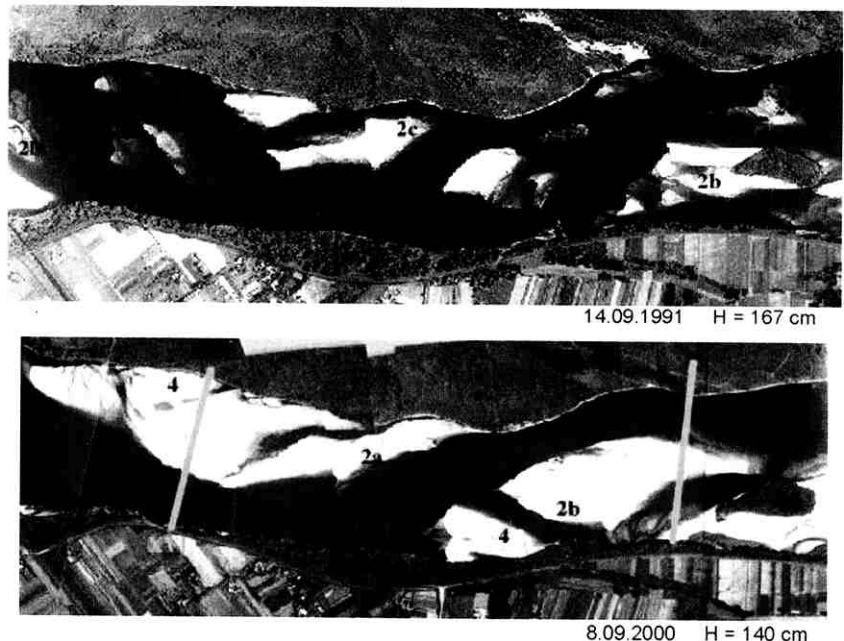


Tabela 3. Wykaz wezbrań na Wiśle w Warszawie w latach 1997–2000  
*List of Vistula River floods in Warsaw in 1997–2000*

Data	H (cm)	Q (m <sup>3</sup> /s)
	Warszawa–Nadwilanówka	
3 III 1997	510	1510
23 IV 1997	480	1330
6 VI 1997	510	1510
<b>14 VII 1997</b>	<b>812</b>	<b>5558</b>
27 VII 1997	634	2466
2 VIII 1997	644	2556
8 VIII 1997	584	2052
20 II 1998	660	2700
<b>26 IV 1998</b>	<b>834</b>	<b>5014</b>
16 VII 1998	548	1770
21 XII 1998	466	1200
9 III 1999	680	2800
26 IV 1999	604	2210
29 VI 1999	700	3000
11 II 2000	632	2453
15 III 2000	713	3133
<b>11 IV 2000</b>	<b>842</b>	<b>5142</b>
23 VII 2000	420	900
5 VIII 2000	678	2792

zostawiają tu zwykle duże odkłady rumowiska rzeczno-ego z klinowym ukształtowaniem górnej krawędzi. Mimo że koryto wód średnich też się zawęża stopniowo, jednak siła poruszająca tych wód jest niewystarczająca i odkłady rumowiska pozostają. Ze względu na żeglugę i bezpieczeństwo powodziowe są one okresowo mechanicznie zredukowane. Działanie średnich wód zaznacza się poprzez częściowe rozmywanie krawędzi bocznych i czołowych. Charakter tych rozmyć świadczy o powolnym, stopniowym działaniu strumienia wody rzecznej. Nie rozmyte utwory korytowe porastają szybko rozwijającą się roślinnością, która utrwała piaszczyste utwory. Ten porost sprzyja zatrzymywaniu rumowiska rzeczno-ego przepływającego ponad łachami i podwyższaniu ich wysokości. Jest to proces przyczyniający się do zmniejszenia przepustowości hydraulicznej koryta i wzrostu zagrożenia powodziowego.

Zmiany ukształtowania koryta rzeczno-ego w rejonie ujęć wody dla miasta oraz EC Siekierki — położonych na tym odcinku — stwarzają zagrożenia ich funkcjonowania, zarówno w okresie pogłębiania dna rzeki, jak i zasypywania ujęć przez przemieszczające się utwory denne. Trzeba dodać, że na przestrzeni wielu lat podejmowano w tym rejonie szereg działań interwencyjnych przy ujęciach (przepompownie pływające, przebudowy progów ujęć, prace pogłębiarskie).

Duże zmiany koryta rzeczno-ego miały wpływ na kształtowanie się poziomu zwierciadła wody w zależności od natężenia przepływu rzeczno-ego. W związku z tym zakłócały wielokrotnie pracę posterunku wodowskazowego Warszawa-Nadwilanówka i wpływały na kształt krzywej konsumpcyjnej w przekroju wodowskazowym. Na skutek tego kilkakrotnie zmieniano sytuowanie wodowskazu i jego poziom referencyjny — tzw. zero wodowskazu (Dobrowolski i in., 1999).

### Rejon „gorsetu warszawskiego”

Porównując stan koryta tego odcinka w ciągu ostatnich lat można stwierdzić, że mimo przejścia kolejnych wielkich wód nie zostały utworzone łachy piaszczyste, utrzymana została przepustowość uregulowanego koryta Wisły. Natomiast można dostrzec wpływ wielkich wód na obszarach między ostrogami na brzegu prawym (wypukłym). Po przejściu wezbrania w roku 1999 teren ten został zaniesiony rumowiskiem, zaś wezbranie w roku 2000 częściowo rozmyło te osady.

### Wpływ morfologii koryta Wisły Środkowej na zjawiska lodowe

Opierając się na kilkuletnich badaniach morfologii rzek i rejestrowanych w okresie zimowym obrazach wideo zjawisk lodowych (również podczas pochodu lodu prądowego, stanowiącego główny problem na Wiśle) stwierdzono wpływ warunków morfologicznych na sposób tworzenia się i formy zjawisk lodowych oraz warunki splywu lodu prądowego (głównie śryżu) zarówno na odcinkach uregulowanych jak i na nieuregulowanych, a także możliwości powstawania zatorów lodowych i występowanie zagrożeń powodziowych (ryc. 3) (Dobrowolski i in., 2000).

### Podsumowanie i wnioski

Cyklicznie opracowywane fotomapy, przedstawiające obraz koryta rzeczno-ego z utworami dennymi oraz wyniki towarzyszących pomiarów terenowych umożliwiają interpretację przebiegu procesów morfologicznych w rzekach.

Dokonano oceny zmian koryta na kilku odcinkach badawczych zróżnicowanych morfologicznie, obserwowanych systematycznie od kilku lat. Stwierdzono, że na Wiśle Środkowej (rzece prowadzącej dużą ilość rumowiska) zasadniczą rolę w przebiegu procesów morfologicznych odgrywały przepływy wielkich wód o dużej energii kinetycznej.

W następstwie zmian morfologicznych koryta zmieniły się wzdłuż biegu rzeki opory przepływu i przepustowość koryta decydująca o stopniu zagrożenia powodziowego.

W związku z powyższymi stwierdzeniami wyniki obrazowań lotniczych łącznie z analizą procesów morfologicznych powinny być wykorzystywane przy wytyczaniu przekrojów hydrometrycznych, odcinków do



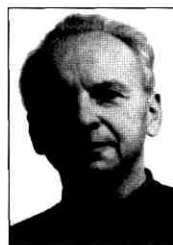
Ryc. 3. Wisła zimą: 1 – odcinek zatorogenny, 2 – splyw lodów na odcinku uregulowanym, 3 – zamarzanie koryta rozczłonkowanego.  
 Fig. 3. Vistula River in winter: 1 – stretch of potential ice-jam risk, 2 – ice run on unregulated river stretch, 3 – freezing of branched river bed.

pomiaru spadku podłużnego zwierciadła wody, wyznaczeniu oporów hydraulicznych koryta rzecznej, warunków splywu lodu — niezbędnych przy ocenie ryzyka zagrożenia powodziowego, do okresowych ocen lokalizacji głównych wodowskazów (zależnie od intensywności procesów korytowych), a także do oceny zagrożeń ujęć wody, co umożliwi podjęcie odpowiednich działań zapobiegawczych.

Szczególnym walorem przedstawionej techniki rejestracji obrazów lotniczych jest szybkie pozyskiwanie informacji włącznie z jej przetworzeniem do postaci fotomapy. Cecha ta odgrywa szczególną rolę w działalności operacyjnej służby hydrologicznej, zwłaszcza w sytuacjach ekstremalnych, tj. suszy lub powodzi.

## Literatura

- Dobrowolski A., Głowacka B., Kondzielski A., 2000, *Problems of slush ice formation and transport in the Middle Vistula River*, Proc. of 15-th International Symposium on Ice, IBW PAN, 28 VIII–1 IX 2000, Gdańsk.
- Dobrowolski A., Fal B., Iwiński J., Kondzielski A., 1999, *Wpływ zmian morfologicznych koryta Wisły na funkcjonowanie warszawskich wodowskazów IMGW*, [w:] *Nauka dla Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej*. Materiały sesji naukowej z okazji 80-lecia Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej w Polsce, Warszawa, 22 II 1999 r.
- Raporty roczne z realizacji tematu H-6 z lat 1991–2000*, IMGW, Warszawa (niepublikowane).



Andrzej Dobrowolski, Head of Water Resources Department, Institute of Meteorology and Water Management, 01-673 Warsaw, Podleśna 61, tel. 569 43 13, fax: 569 45 60, e-mail: Andrzej\_Dobrowolski@imgw.pl



Barbara Głowacka, Specialist in Water Resources Department, Institute of Meteorology and Water Management, 01-673 Warsaw, Podleśna 61, tel. 569 42 23, e-mail: Barbara\_Głowacka@imgw.pl



Jolanta Krupa-Marchlewska, Specialist in Water Resources Department, Institute of Meteorology and Water Management, 01-673 Warsaw, Podleśna 61, tel. 569 45 62.