

Andrzej DOBROWOLSKI, Barbara GŁOWACKA, Andrzej KONDZIELSKI

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa
Institute of Meteorology and Water Management in Warsaw

Transport i sedymentacja rumowiska unoszonego na zdjęciach lotniczych

Transportation and deposition of suspended sediment on airborne photographs

Słowa kluczowe: rumowisko unoszone, sedymentacja rumowiska rzecznego, mętność ogólna wody, teledetekcja lotnicza

Key words: suspended sediment, deposition of river sediment, turbidity, airborne photographs

Wprowadzenie

Badania teledetekcyjne mętności wody mają specjalne zastosowanie w rozpoznawaniu i monitorowaniu rumowiska w wodach powierzchniowych (Engman i Gurney 1991).

Pasmo widzialne promieniowania elektromagnetycznego wykorzystywane jest w badaniach teledetekcyjnych jakości wody – w tym poprzez pomiar energii światła odbitego.

Występowanie rumowiska unoszonego zwiększa stopień odbicia promieniowania elektromagnetycznego od wody w zakresie spektralnym pasma widzialnego (albedo). Od lat siedemdziesiątych wykorzystywano tę właściwość

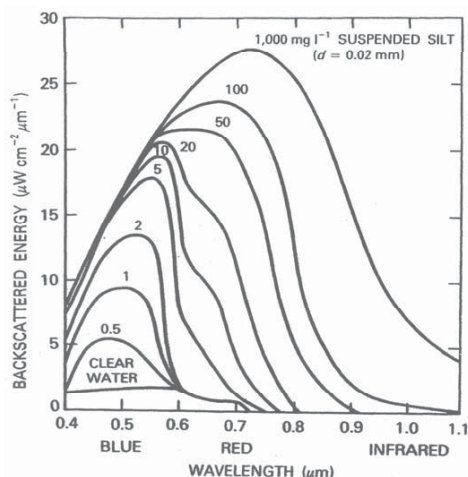
do monitorowania dopływu i ruchu wód oraz przebiegu sedymentacji w wielkich jeziorach Ameryki Płn. i Afryki przy użyciu obrazów z Landsata 5.

Na zdjęciach lotniczych obiektów wodnych następuje rejestracja światła odbitego od tych obiektów. Wyodrębniają się obszary różniące się wielkością albedo ze względu na barwę, koncentrację zawiesiny lub obecność substancji i cząstek pływających. Jednak relacje ilościowe pomiędzy mętnością (i innymi parametrami jakości wody) i albedo muszą być ustalone doświadczalnie ze względu na wpływ zmian na głębokości zawiesiny i zanieczyszczeń, a w konsekwencji – zmian intensywności promieniowania odbitego.

W modelu Suitsa (Lyon i Hutchinson 1995) promieniowanie ze słupa wody jest sumą promieniowania z masy wody i promieniowania odbitego od dna.

Materialy i metody

Zawartość rumowiska unoszonego w wodzie zmienia w istotny sposób charakterystykę światła odbitego. Rysunek 1 ilustruje wpływ zawartości rumowiska w wodzie na zmniejszenie energii światła odbitego. Dzięki temu wpływowi zdjęcia lotnicze wykonywane z odpowiedniego pułapu i w odpowiednich warunkach atmosferycznych dobrze dokumentują transport unoszonego rumowiska rzecznego, zmiany jego koncentracji i sedymentację w akwenach.



RYSUNKU 1. Wpływ zawartości rumowiska rzecznego na wielkość energii światła odbitego (Engman i Gurney 1991)

FIGURE 1. Influence of the suspended sediment content on reflected light energy

Wybrane przykłady przedstawiono w dalszej części artykułu. Pochodzą one z własnych obrazowań lotniczych głównych rzek Polski od 1990 roku oraz Loary we Francji w 1994 i 1995 roku. W początkowym okresie rejestrację barwnego obrazu obiektów wodnych prowadzono przy użyciu pokładowego systemu wi-

deokomputerowego, systematycznie ulepszanego. Natomiast od 2003 roku używano własnego lotniczego sprzętu do ciągłej cyfrowej rejestracji obrazu terenu. Rozdzielczość geometryczna obrazu rejestrowanego wzrosła ponad 4-krotnie w stosunku do uzyskiwanego poprzednio, co umożliwiło wykonywanie barwnych ortofotomap.

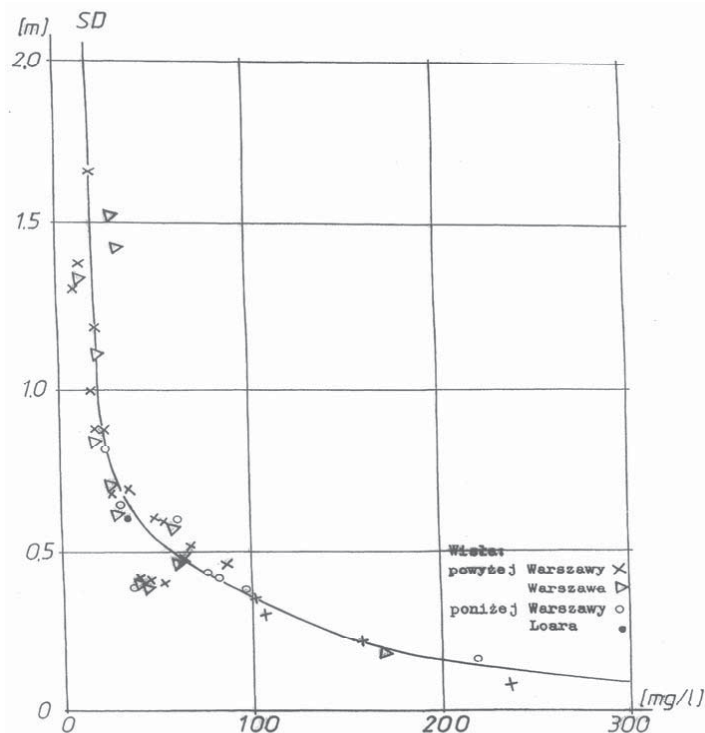
Głębokość obrazowania lotniczego

Mętność ogólna wody w warunkach transportu rumowiska w rzece ogranicza zasięg głębokości obrazowania lotniczego poprzez odbicie, rozpraszanie i pochłanianie światła słonecznego. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów widoczności standardowego krążka Secchiego (SD) w Wiśle środkowej i w Loarze w zależności od mętności ogólnej wody ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$). Zaznacza się wyraźna zmiana charakteru zależności przy mętności przekraczającej $50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, gdy zasięg widoczności SD spada poniżej 0,5 m.

Seria pomiarów wykonanych przez autorów na środkowej Wiśle powyżej Warszawy (a więc bez wpływu ścieków miejskich) pozwoliła na ustalenie, że spadek widoczności SD poniżej 0,5 m zachodzi z reguły podczas przepływów rzecznych większych od średniej wody SSW (Dobrowolski i in. niepubl.).

Transport rumowiska unoszonego

Transport rumowiska w rzece Bug zarejestrowali autorzy na obrazie z kamery wideo umieszczonej w samolocie. Podczas prac technicznych odstrzelenie ładunków wybuchowych w dnie rzeki



RYSUNEK 2. Widoczność krążka Secchiego w środkowej Wiśle i w Loarze w zależności od mętności ogólnej wody

FIGURE 2. Secchi disk visibility in Vistula River and Loire River vs water turbidity

spowodowało wypływ rumowiska rzeczynego i jego transport w przypowierzchniowej warstwie wody. Na załączonym obrazie wideo (rys. 3) przedstawiono początkowy odcinek strumienia rumowiska z widocznym zwiększeniem koncentracji na bocznych krawędziach, tj. w strefie kontaktu ze strumieniem wody rzecznej. Zobrazowanie wideo z pokładu samolotu pozwoliło na szybkie – w niecałe pół godziny (a więc przy ustalonym przepływie), udokumentowanie układu strumienia rumowiska w rzece na długości około 50 km.

W korytach rzek swobodnie płynących transport rumowiska unoszonego ma charakter „przepływu obłokowego”,

a koncentracja rumowiska jest zróżnicowana przestrzennie i w czasie. Na zmienność tę wpływa zarówno zmienność dopływu rumowiska, jak i prądy wewnętrzne w masie wody, turbulentny charakter przepływu rzeczynego, morfologia koryta rzeczynego oraz jego zabudowa inżynierska. Zróżnicowanie przestrzenne koncentracji rumowiska unoszonego jest dobrze widoczne dzięki różnicom barwnym na obrazach wideo zarejestrowanych podczas wezbrań Loary:

- w pobliżu mostu, gdzie morfologia koryta jest dodatkowo skomplikowana przez wyspę i liczne łachy piaszczysto-żwirowe pod zwierciadłem wody (rys. 4a),



RYSUNEK 3. Obraz wideo transportu rumowiska unoszonego w powierzchniowej warstwie wody rzeki Bug

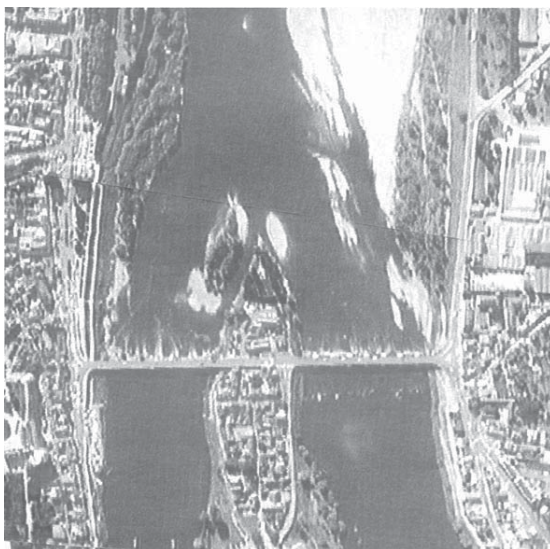
FIGURE 3. Video frame of the suspended sediment in surface layer of Bug River

- przy opływie ukośnej budowli regulacyjnej, poza którą występuje obszar zastoiskowy o szybkiej sedymentacji – wyróżniony jasną barwą (rys. 4b),
- przy opływie wyspy – z piaszczystym brzegiem) (rys. 4c).

Zobrazowanie lotnicze podczas przepływu rumowiska unoszonego w Loarze i w Wiśle w rejonie dopływów rzek nieprowadzących rumowiska (rys. 5a, b), poza udokumentowaniem zróżnicowania przestrzennego mętności wody,

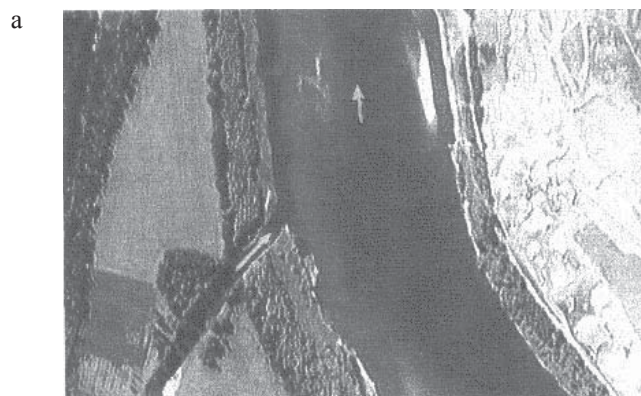
b

a





RYSUNEK 4. Zróżnicowanie transportu rumowiska unoszonego w Loarze: a – w rejonie mostu i utworów korytowych, b – przy opływie budowli regulacyjnej, c – przy opływie wyspy
 FIGURE 4. Differentiation of suspended sediment transport in Loire River: a – near bridge and river bed forms, b – near hydraulic structure, c – during flow around the island



RYSUNEK 5. Transport rumowiska unoszonego: a – w Loarze w rejonie ujścia Beuvron (1994 r.), b – w Wiśle w rejonie ujścia Pilicy (2003 r.)
 FIGURE 5. Suspended sediment transport: a – in Loire River near Beuvron estuary (1994), b – in Vistula River near Pilica estuary (2003)

pozwoili również na zobrazowanie zasięgu odrębności strumienia wód dopływu w korycie recypienta.

Taki materiał zdjęciowy stanowi istotne źródło informacji zarówno dla modelowania hydrauliki przepływów rzecznych, jak i dla oceny ekohydrologicznego stanu rzeki. Na tych ilustracjach przedstawiono obraz lotniczy wideo – Loara 1994, i zdjęcie lotnicze wysokiej rozdzielczości – Wisła 2003, zarejestrowane nowym pokładowym systemem. Dodać trzeba, że zdjęcie zarejestrowane w postaci cyfrowej na twardym dysku komputera pokładowego można łatwo poddać korekcji radiometrycznej i geometrycznej.

Sedymentacja rumowiska rzeczno-

Sedymentacja rumowiska rzeczno- (depozycja) jest oprócz erozji i transportu rumowiska nieodłącznym elementem procesów hydromorfologicznych. Zachodzi głównie w miejscach, gdzie zmniejsza się siła transportowa rzeki za-

leżna od natężenia przepływu rzeczno-, spadku i kształtu koryta rzeczno-. Jak określił Klimaszewski (1994): „wzmoczenie depozycji następuje w odcinkach i miejscach, gdzie: a) zmniejsza się spadek koryta, b) zmniejsza się masa wody, c) rozszerza się koryto i rośnie tarcie, d) rzeka jest podparta, e) rzeka uchodzi do zbiornika morskiego, jeziornego lub zaporowego”.

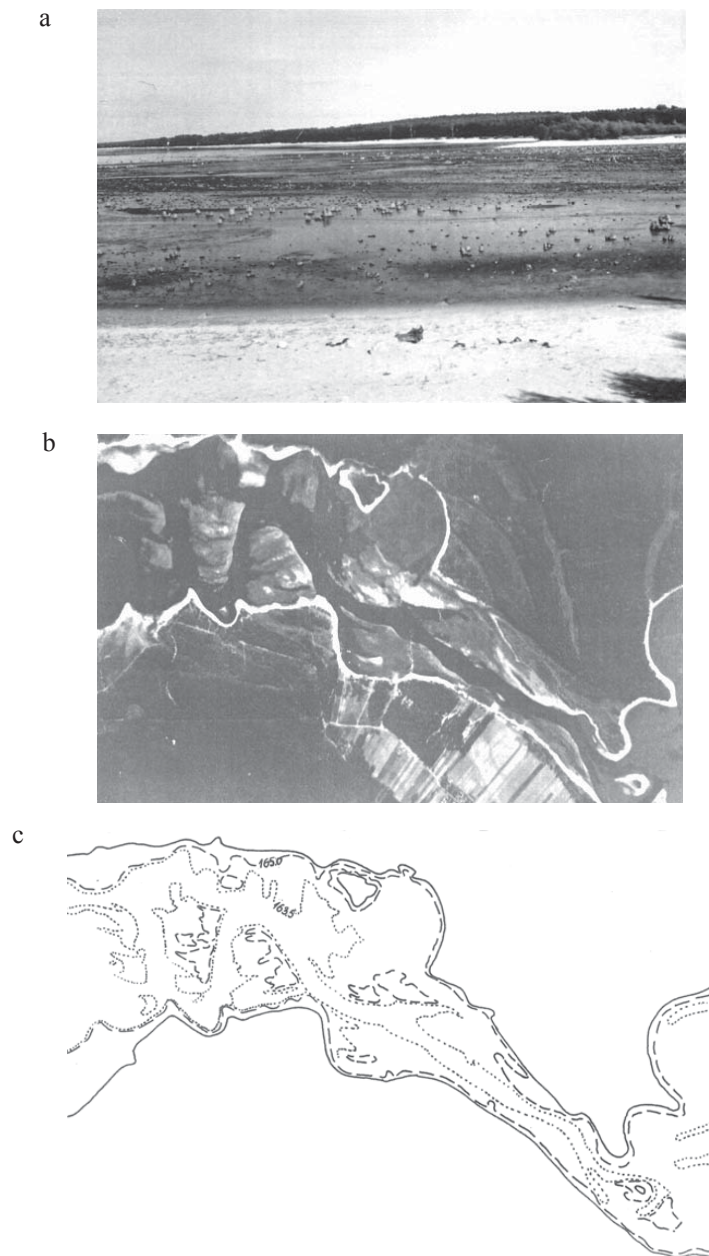
Przykładem naturalnego podparcia rzeki jest podpiętrzenie spowodowane dopływem wód o odpowiednio dużej energii kinetycznej. Taka sytuacja następuje na przykład przy uregulowanym dopływie rzeki Wieprz do Wisły. Na zdjęciu lotniczym (rys. 6) widoczne są odkłady rumowiska w Wiśle spowodowane okresowym miejscowym podpiętrzeniem jej wód przez dopływ.

Następne zdjęcia lotnicze przedstawiają sedymentację rumowiska związaną z działalnością człowieka.

W cofce zbiornika Sulejów na Pilicy (rys. 7a) następuje sedymentacja drobnych frakcji rumowiska. Osady te nasycane nieoczyszczonymi ściekami mają ciemną barwę, co wyraźnie widać na



RYSUNEK 6. Sedymentacja rumowiska rzeczno- przy ujściu Wieprza do Wisły
FIGURE 6. Deposition of sediment near Wieprz and Vistula confluence



RYSUNEK 7. Zdjęcie zbiornika Sulejów na Pilicy (a), sedymentacja rumowiska w cofce zbiornika Sulejów na Pilicy (b), szkic warstwicy zbiornika Sulejów wykonany na podstawie analizy zdjęć lotniczych (c)

FIGURE 7. Photo of the Sulejów reservoir – Pilica River (a), deposition of sediment in Sulejów reservoir – Pilica River (b), sketch of hypsometric layers in Sulejów reservoir on the base of airborne photos analysis (c)

zdjęciu lotniczym (rys. 7b). Boczne granice zanieczyszczonych osadów wyznaczają na zdjęciu wyżej położone piaszczyste obrzeża doliny Pilicy wyróżnione jasną barwą.

Mimo że ciemna barwa dna, powodując zanik odbicia światła, uniemożliwia interpretację głębokości, zdjęcia lotnicze cofki zbiornika wykorzystano w celu uaktualnienia pojemności czynnej zbiornika. Na załączonym szkicu (rys. 7c) przedstawiono interpretację warstwicową, wykonaną na podstawie kilku zdjęć lotniczych linii brzegowej, podczas stopniowego opróżniania zbiornika przy wykorzystaniu danych o zmieniającym się poziomie zwierciadła wody na wodowskazach zbiornika.

Szczególny przypadek sedymentacji rumowiska rzecznego zachodzi na Wiśle w rejonie Warszawy. Rzeka o charakterze dzikim, anastomozująco-roztokowym powyżej Warszawy, w obrębie aglomeracji miejskiej jest uregulowana z silnym zawężeniem koryta średnich i wielkich wód (tzw. gorset warszawski). Na odcinku przejściowym długości 11 km następuje sedymentacja rumowiska transportowanego głównie przez wielkie wody o dużej dynamice przepływu. Na przykład podczas przejścia fali wezbraniowej w lipcu 1997 roku $Q = 5150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, średnia prędkość przepływu powyżej Warszawy była dwukrotnie mniejsza niż na odcinku miejskim ($1,17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wobec $2,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), a siła poruszająca według Dubuata była mniejsza prawie 1,7 razy (Dobrowolski i in. 2004).

Na zdjęciu lotniczym wykonanym przy niskim stanie i małej mętności (rys. 8a) widoczne są liczne formy korytowe, włącznie z częściami zanurzonymi o barwie ciemniejszej wraz z głęboko-

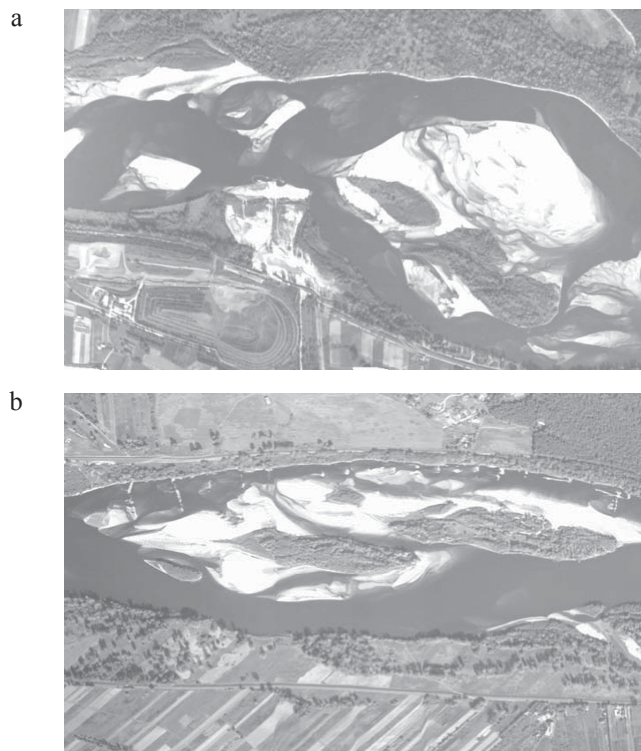
ścią – aż do granic widoczności. Zwraca uwagę skomplikowany układ tych form, wywołujący liczne zmiany kierunku nurtu i wzrost oporów ruchu. Widoczne są ślady erozyjnego działania kolejnych wezbrań, utrwalanie nierozmytych łach piaszczystych przez porost i przekształcanie ich w wyspy oraz dopływ do nich mas rumowiska transportowanych przez kolejne wezbrania.

Poniżej Warszawy, wobec rozszerzenia koryta Wisły (z 400 do 1188 m) oraz około 1,5-krotnego spadku średniej prędkości przy przepływie wielkich wód, osadza się rumowisko rzeczne wyerodowane z silnie zawężonego „gorsetu warszawskiego”. Zdjęcia lotnicze dobrze dokumentują sedymentację i okresową transformację powstałych tu utworów korytowych, stwarzających zagrożenie zatorowe (rys. 8b).

Zdjęcia lotnicze, wykonane przez zespół Zakładu Hydrografii i Morfologii Koryt Rzecznych IMGW Warszawa przetworzone do postaci ortofotomapy, przedstawiono na rysunku 9. Są to obrazy dolnego stanowiska stopnia Włocławek na Wiśle, z widocznymi strefami erozji i sedymentacji oraz strefą sedymentacji rumowiska wyerodowanego ze stanowiska dolnego stopnia, w odległości około 27 km poniżej, w postaci zespołu łach piaszczystych, zmniejszających w istotny sposób przepustowość hydrauliczną koryta i zwiększających zagrożenie powodziowe.

Wnioski

Przedstawione powyżej obrazy koryta potwierdzają zalety teledetekcji lotniczej, pozwalającej na szybką, praktycznie



RYSUNEK 8. Sedymentacja rumowiska w Wiśle: a – powyżej „gorsetu warszawskiego”, b – poniżej „gorsetu warszawskiego” (rejon m. Jabłonna)
 FIGURE 8. Deposition of sediment in Vistula River: a – upstream Warsaw, b – downstream Warsaw – region of Jabłonna town

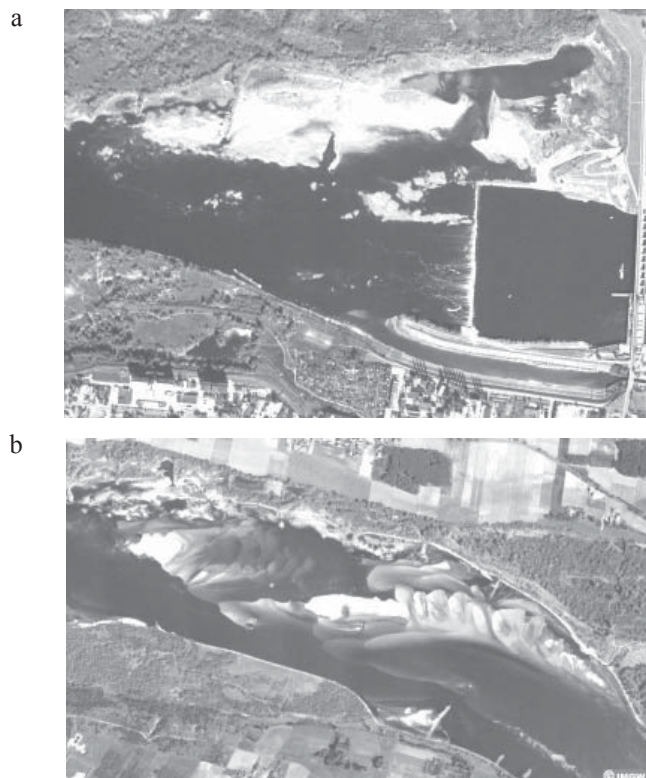
jednoczesną rejestrację stanu długiego odcinka rzeki (obecnie w postaci cyfrowej), a następnie na opracowanie komputerowe obrazu i szczegółową analizę procesów korytowych, w tym transportu rumowiska, wpływu zabudowy koryta, lokalizacji stref intensywnej sedymentacji rumowiska stwarzającego zagrożenie zatorowe i powodziowe, utrudnienia eksploatacji budowli hydrotechnicznych i ujęć wody.

Obraz transportu rumowiska unoszonego w rzece może być pomocny przy doborze przekrojów i punktów pomiarowych rumowiska rzecznego.

Traktując rumowisko unoszone jako traser, można wykorzystywać zdjęcia lotnicze długich odcinków rzek podczas wezbrań do udokumentowania hydrodynamiki przepływów rzecznych, zróżnicowania przepustowości koryta, ruchu masy wody w zbiornikach, prawidłowości funkcjonowania budowli wodnych oraz ich oddziaływania na procesy korytowe.

Literatura

DOBROWOLSKI A. i inni: Raporty roczne z realizacji badań w ramach działalności sta-



RYSUNEK 9. Erozja rumowiska poniżej stopnia wodnego Włocławek (a), sedimentacja rumowiska wyerodowanego w dolnym stanowisku stopnia Włocławek (b)
 FIGURE 9. Sediment erosion below the Włocławek dam (a), deposition of sediment downstream Włocławek dam (b)

- tutowej IMGW (temat H-6) z lat 1991–2001, Warszawa (niepublikowane).
- DOBROWOLSKI A. 1992: Obrazowanie lotnicze koryta Wisły techniką wideo. *Wiadomości IMGW* 4.
- DOBROWOLSKI A., KONDZIELSKI A. 2007: Poster na konferencji PTGeof (publikacja w druku).
- DOBROWOLSKI A., GŁOWACKA B., KRUPA-MARCHLEWSKA J. 2004: Określenie zmian morfologicznych koryta Wisły poniżej Warszawy w oparciu o lotnicze zobrazowanie terenu metodą wideo-komputerową. *Teledetekcja Środowiska* 33.
- ENGMAN E.T., GURNEY R.J. 1991: Remote Sensing in Hydrology. Chapman and Hall, London.
- KLIMASZEWSKI M. 1994: Geomorfologia ogólna. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- LYON J.G., HUTCHINSON W.S. 1995: Application of a Radiometric Model for Evaluation of Water Depths and Verification of Results with Airborne Scanner Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 61, 2: 161–166.
- LIEDTKE J., ROBERTS A., LUTERNAUER J. 1995: Practical Remote sensing of Suspended Sediment Concentration. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 61, 2: 167–175.

Summary

Transportation and deposition of suspended sediment on airborne photographs. Using optical features of water and suspended sediment, series of imageries of Polish rivers (mainly of Vistula River) and Loire River in France were registered from aircraft, beginning from 1990, at first with video-computer technique, later using the own aircraft system for fluent digital registration of a terrain. In the selected examples were presented images of suspended sediment with spatial differentiation of its concentration in river, in the morphologically different stretches. There were suggested possibilities

of use of the suspended sediment as a tracer in researches of hydro-morphological processes, for ex. sedimentation and evaluation of the ecological state of rivers.

In the range of examples use of airborne photographs was presented to the identification of sediment deposition zones in natural conditions and changed by human activity.

Authors' address:

Andrzej Dobrowolski, Barbara Głowacka,
Andrzej Kondzielski
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Zakład Hydrografii i Morfologii Koryt Rzecz-
nych
ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa