

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2016), 25 (3), 311–322
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2016), 25 (3)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2016), 25 (3), 311–322
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2016), 25 (3)
http://iks_pn.sggw.pl

Ewa FALKOWSKA¹, Tomasz FALKOWSKI², Michał BRACH³

¹Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski

²Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

³Wydział Leśny, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Wykorzystanie numerycznego modelu terenu (NMT) w analizie zróżnicowania facjalnego osadów wezbraniowych Wisły między Basonią a Solcem nad Wisłą oraz jego znaczenia dla koncentracji metali ciężkich*
The use of digital elevation model (DTM) in the facies differentiation analysis of flood sediments of the Vistula river between Basonia and Solec upon Vistula and its importance for the concentration of heavy metals

Słowa kluczowe: dolina Wisły, morfodynamika, równia zalewowa, środowiska depozycji, koncentracja metali ciężkich

Key words: Vistula river valley, morphodynamics, floodplain, depositional environments, heavy metal distribution

Wprowadzenie

Istotnym składnikiem analiz stanu środowiska przyrodniczego wykonywanych dla potrzeb planowania przestrzennego czy oceny przekształceń antropo-

genicznych jest określenie zawartości metali ciężkich w utworach powierzchniowych. Są one uznawane za jeden ze wskaźnikowych parametrów identyfikujących stan środowiska i stopień jego transformacji przebiegającej pod wpływem czynników naturalnych i antropogenicznych (Vanderberghe, 2002; Miller i Orbock-Miller, 2007). Warunkiem prawidłowej oceny zawartości metali ciężkich w osadach współczesnych równin zalewowych dolin rzecznych jest rozpoznanie zróżnicowania dynamiki

*Opisane w artykule badania prowadzono w ramach projektu pt. „Związek morfodynamiki równi zalewowej z dystrybucją metali ciężkich pochodzenia antropogenicznego we współczesnych aluwjach Wisły Środkowej na odcinku od Sulejowa do Kazimierza Dolnego” sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki na podstawie decyzji DEC-012/05/B/ST10/00931.

środowisk depozycji utworów wezbraniowych. Koncentracja metali ciężkich w różnych typach litologicznych osadów powstających w czasie jednego epizodu wezbraniowego jest bowiem różna i zależy między innymi od tempa depozycji czy intensywności erozji wezbraniowej powodującej uruchamianie wcześniej zdeponowanego ładunku. Analiza morfodynamiki obszaru równi zalewowej poza identyfikacją cech teksturalnych osadów wezbraniowych (struktury sedymentacyjne, następstwo litofacji) polega na precyzyjnym rozpoznaniu rzeźby jej powierzchni. Rozwój techniki skaningu laserowego i upowszechnienie precyzyjnego, numerycznego obrazu powierzchni Ziemi otworzyły nowe możliwości w analizie morfodynamiki dolin rzecznych. Prezentowane badania prowadzone były w dolinie środkowej Wisły na odcinku od Sulejowa (km 310 biegu) do okolic Solca nad Wisłą (km 330). Podstawą badań terenowych mających na celu identyfikację zróżnicowania profilu litologicznego osadów wezbraniowych i ich opróbowanie była analiza NMT. Model został pozyskany z zasobów Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w formacie ASCII XYZ o rozdzielczości około 10 m. Posłużył on jako materiał wyjściowy do wygenerowania przekrojów morfologicznych w zadanych miejscach oraz kierunków spływu powierzchniowego o określonej gęstości. Strukturę strumieni przekształcono do formatu wektorowego, co pozwoliło na przygotowanie mapy spływu wód będącej pochodną spadków uzyskanych z numerycznego modelu terenu.

Morfogeneza analizowanego odcinka doliny Wisły

Geneza doliny Wisły na odcinku Małopolskiego Przełomu związana jest z występowaniem w jej podłożu dyslokacji tektonicznych różnego rzędu o przebiegu równoległym do biegu rzeki (Sawicki, 1933; Romanek i Złonkiewicz 1993; Pożaryski i inni, 1994). W ostatecznym ukształtowaniu tego przełomu kluczową rolę odgrywała erozja przedczwartorzędowa (Sawicki, 1933; Pożaryski, 1955), i/lub wczesnoczwartorzędowa (Pożaryski i inni, 1994). Dolina Wisły funkcjonowała na odcinku Małopolskiego Przełomu już w czasie interglacjału małopolskiego (MIS 15-17), ale jego pogłębienie nastąpiło dopiero po zaniku lądolodu zlodowacenia Odry (MIS 10) (Pożaryski i inni, 1994).

Funkcjonowanie rzeki w późnym plejstocenie w warunkach dużej podaży rumowiska zapisało się w dolinie powstaniem systemu tarasów nadzalewowych, których powierzchnię w strefach podskarpowych budują utwory stokowe (Pożaryski, 1955), a także utwory eoliczne (Gębica, 2004). Na odcinkach zwężeń doliny zachowały się zaledwie relikty tych powierzchni.

Zmiany reżimu hydrologicznego u schyłku plejstocenu i w holocenie spowodowały stopniowe wyrównanie przepływów i wykształcenie przez Wisłę koryta meandrowego. Meandrująca rzeka wciągała się w plejstocenijskie aluwia, budując poziom równi zalewowej. Poziom ten był formowany do XVII wieku (Falkowski, 1967).

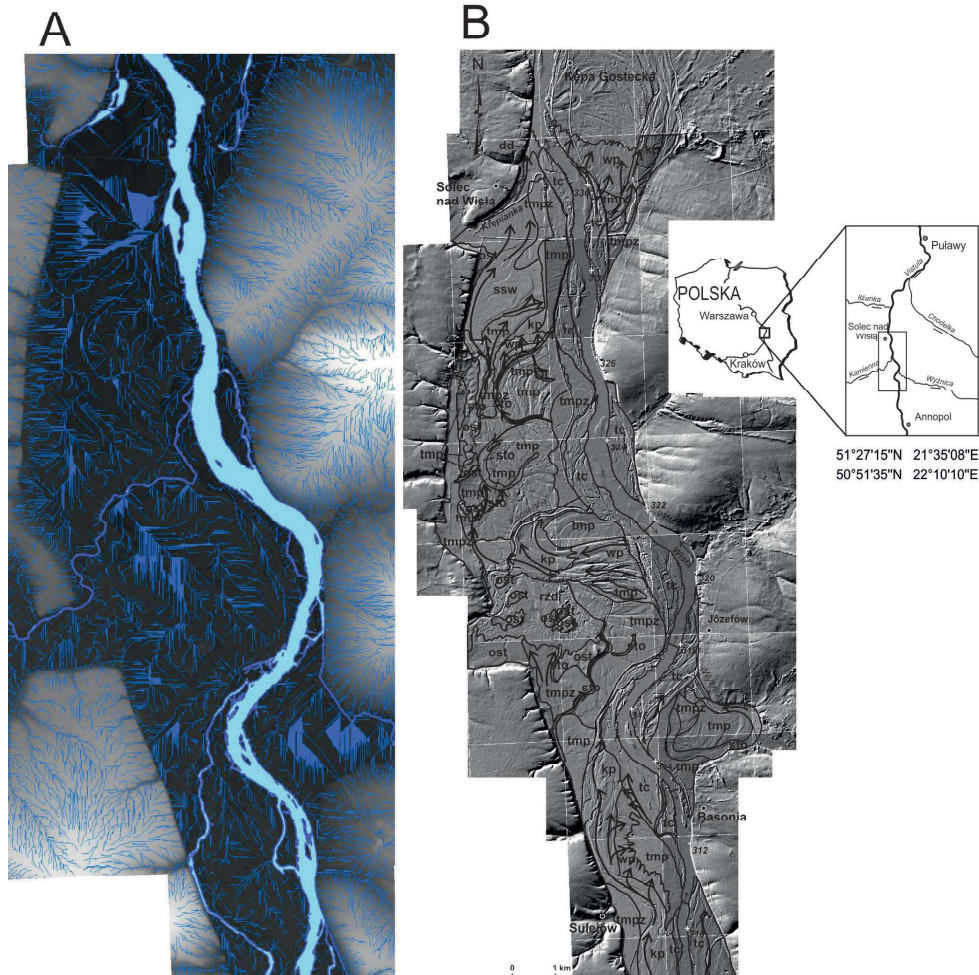
Ewolucja systemu rzecznej Wisły polegająca na zwiększaniu różnic między przepływami ekstremalnymi nastąpiła w okresie subatlantyckim holocenu głównie pod wpływem działalności człowieka (Falkowski, 1967; Starkel, 1983). Zapisała się ona w dolinie zmianą typu rozwinięcia koryta Wisły z meandrującego na roztokowe. Przeciążona rumowiskiem rzeka nadbudowała strefę korytową, przebudowując także powierzchnię równi zalewowej. Procesowi temu sprzyjała specyfika budowy geologicznej doliny, polegająca na braku w pełni wykształconego cokołu erozyjnego (Falkowski, 2007). Cecha ta była szczególnie istotna dla rozwoju doliny na odcinkach jej zwężeń. Wraz z pojawieniem się w korycie ekstremalnie dużych przepływów zwiększyła się głębokość przeróbki wezbraniowej (erozji wgłębnej wielkich wód; por. Leopold i inni, 1964). Na odcinkach, gdzie skały budujące cokół erozyjny tworzą w podłożu aluwii morfologiczne kulminacje, pogłębianie koryta w czasie wezbrań jest utrudnione. Piętrzone w takich strefach wody wezbrań zarówno opadowych, jak i zatorowych (Falkowski i Popek, 2000) wdzierały się na równię zalewową, przeobrażając jej powierzchnię. Działo się tak także po wybudowaniu wałów przeciwpowodziowych w wyniku ich awarii. Utwory deponowane na miejsce rozmywanych starszych osadów charakteryzują się często dużo większym zróżnicowaniem granulometrii i składu mineralnego niż osady z okresu meandrowania (Falkowski, 2007; Falkowska i Falkowski, 2015). Współczesne przepływy wezbraniowe przeobraziły także starorzeczka z okresu meandrowania rzeki, wypełniając je często całkowicie osadem mineralnym (Falkowska i Falkowski, w druku)

Material i metody

Badania prowadzono na odcinku zwężenia doliny Wisły od Sulejowa (km 310) do Solca nad Wisłą (km 330) – rysunek 1.

W celu określenia zróżnicowania litologicznego dna doliny Wisły wykonano kartowanie geologiczne. W identyfikacji stref morfodynamicznych wykorzystywano numeryczny model terenu (NMT) oraz sieć strumieni. Przebiegi cieków pozwalają na uczytelnienie cech topograficznych i geologicznych (Pan i inni), oraz zrozumienie kierunków transportu materiałów rzecznych (Weil-la i inni, 2013). Do opracowania modelu strumieni wykorzystano klasyczny schemat analizy hydrologicznej wykorzystującej NMT jako warstwę wejściową (rys. 2). Kluczowym elementem procesu jest właściwy dobór wartości progowej na mapie akumulacji spływu, która w efekcie determinuje liczbę wyróżnionych cieków wraz z kierunkiem ich spływu (Wasilewski i Chormański, 2009). Punkty badawcze i granice wydzieleń lokalizowano w terenie z wykorzystaniem odbiorników kodowych DGPS. Wyniki badań archiwizowano w bazie danych GIS. W trakcie prac terenowych pobrano 110 próbek osadów do analiz laboratoryjnych.

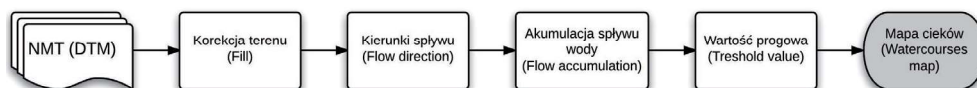
Charakterystyka litologiczna badanych utworów obejmowała analizę granulometryczną (areometryczną i sitową), oznaczenie zawartości węgla wapnia metodą Scheiblera, określenie pH (w H₂O) metodą potencjometryczną (Myślińska, 1984). Skład mineralny frakcji iłowej oznaczono metodą rentgenostrukturalną. Badano próbki orientowane: sedymentowane, po glikolowaniu i prażone.



- | | | | | | |
|-------------|--|-------------|---|------------|--|
| tmpz | taras rzeki meandrującej przeobrażony o płaskiej powierzchni reworked floodplain surface formed by meandering river with a flat and levelled surface | sto | starorzecza oxbow lakes | tc | współczesny taras madowy contemporary floodplain |
| tmp | taras rzeki meandrującej przeobrażony o urozmaiconym reliefie reworked floodplain surface formed by meandering river with distinct surface relief | wp | strefy depozycji wałów przykorytowych levee deposition zones | dd | strefy depozycji deltowej deltaic deposition zones |
| kp | strefy skoncentrowanego przepływu wód powodziowych concentration flow zones of flood waters | rzd | równia zalewowa dopływów floodplain of the tributaries of the Vistula | ost | taras plejstoceniński Pleistocene terrace |
| ssw | strefy stagnacji wód stagnation zones of flood waters | próg | próg w podłożu aluwiiw basement protrusion | | |
| ↑ | kierunki przepływu wód powodziowych directions of flood waters flow | | | | |

RYSUNEK 1 Sieć odpływu powierzchniowego (A) oraz formy rzeźby terenu analizowanego odcinka doliny Wisły przedstawione na cieniowanym obrazie NMT (B) z lokalizacją obszaru badań (Falkowska i inni, 2016, zmienione)

FIGURE 1. Surface flow network (A) and morphodynamic features of the analysed part of the Vistula river valley overlaid on DTM (B) with location of the study area (Falkowska et al., 2016, modified)



RYSUNEK 2. Schemat analizy hydrologicznej pozwalającej na utworzenie mapy cieków z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu (NMT)

FIGURE 2. Algorithm of hydrological analysis from DTM in order to generate stream link map

Do badań zawartości wybranych pierwiastków, w tym metali ciężkich, wytypowano 109 próbek osadów reprezentatywnych dla wydzielonych form rzeźby terenu. Próbkę były pobierane z głębokości 45–50 cm. W laboratorium próbki zostały zhomogenizowane i uśrednione, a następnie przemyte przez sito 1,0 i po wysuszeniu zmielone w bębnoch kulowych. Próbkę o wadze 0.25 g rozpuszczano w roztworze (2 : 2 : 1 : 1) H₂O-HF-HClO₄-HNO₃. Następnie roztwory odparowano i rozpuszczono w 50-procentowym HCl. W tak otrzymanych roztworach oznaczono zawartość pierwiastków śladowych metodą ICP-ES lub ICP-MS. Zawartość substancji organicznej oznaczono metodą strat prażnia. Wszystkie oznaczenia wykonano w Laboratorium AcmeLabs (Bureau Veritas Commodities Canada Ltd). Do oceny w próbkach zawartości Fe autogenicznie wytrącanego z wody rzecznej wyliczono stosunek Fe do Al (Lopez i inni, 2006)

Wyniki analiz zawartości pierwiastków śladowych zostały zgrupowane z wykorzystaniem analizy zgodności – CA (Greenacre, 1984; Ferreira da Silva i inni, 2013). Analizę Anova zastosowano do oceny poziomu zróżnicowania koncentracji tych pierwiastków w wydzielonych formach rzeźby terenu. F-statystykę oraz nieparametryczne testy Kruskala–Wallisa wykorzystano do określenia istotności tego zróżnicowania (*p* – prawdopodobieństwo) (Appleton

i Adlam, 2012). Analizy statystyczne wykonano w programie Statistica 10.

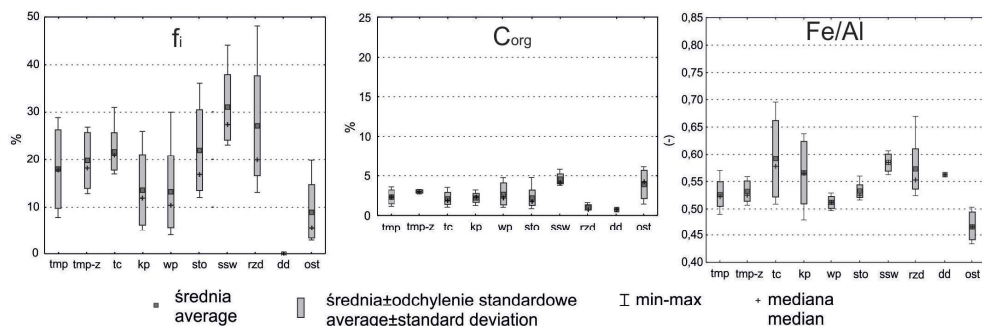
Wyniki

Na podstawie analizy DTM oraz badań terenowych wydzielono na analizowanym odcinku doliny Wisły następujące typy form rzeźby (rys. 1):

1. Przeobrażona powierzchnia równi zalewowej uformowana przez rzekę meandrującą tmp. W jej obrębie wyróżniono część mającą płaską, wyrównaną powierzchnię (tmpz) oraz część o bardziej wyraźnym reliefie (tmp). Forma ta charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem profili litologicznych osadów wezbraniowych. Budują je wzajemnie przewarstwione piaski gliniaste, pyły, gliny i ropy pyłaste oraz ropy z wkładkami piasków. Zawartość substancji organicznej w tych madach jest niewielka (rys. 3). CaCO₃ występuje w osadach budujących tę formę lokalnie, a jego zawartość dochodzi do 2,3%.

2. Starorzecza (sto). Formy te związane są genetycznie z powierzchnią tmp. Na powierzchni równi zalewowej tworzą ciągi obniżenia wykorzystywane przez przepływy wezbraniowe. W efekcie stropową część ich wypełnienia stanowią osady mineralne, wzbogacone jedynie w substancję organiczną.

3. Proksymalna część współczesnej równi zalewowej (tc). Strefa ta związana



RYSUNEK 3. Zawartość frakcji ilowej, substancji organicznej oraz autogenicznego żelaza w osadach doliny Wisły analizowanego odcinka (Falkowska i inni, 2016, zmienione)
 FIGURE 3. Content of clay, organic matter and authogenic iron in deposits of the Vistula river valley analysed (Falkowska et al., 2016 modified)

jest z depozycją współczesnej rzeki roztokowej. Powierzchnię tej strefy budują gliny, gliny pylaste i łyły pylaste zawierające lokalnie niewielkie ilości CaCO_3 (do 1,5%).

4. Strefy skoncentrowanego przepływu wód wezbraniowych – koryta wezbraniowe (kp). Utwory budujące powierzchnię tego typu form to piaski gliniaste, pyły, gliny rozdzielone warstwami piasku o różnej miąższości. Utwory te często zawierają CaCO_3 w ilości do 1,6%.

5. Strefy depozycji wałów przykorytowych (wp). Występują w sąsiedztwie stref skoncentrowanego przepływu (koryta Wisły i koryt wezbraniowych kp). Formy tego typu budują głównie piaski gliniaste i pylaste, pyły oraz lokalnie gliny. Zawartość CaCO_3 w tych utworach nie przekracza 1%.

6. Strefy stagnacji wód zalewów wezbraniowych (ssw). Powierzchnie tych stref budują gliny pylaste i łyły pylaste o zawartości substancji organicznej dochodzącej do 5%. Lokalnie zawierają CaCO_3 w ilości dochodzącej do 10%. Występują tu także duże zawartości tlenków żelaza autogenicznego.

7. Strefy depozycji deltowej (dd). Są to niewielkie delty uformowane u wylotu stref skoncentrowanego przepływu wód wezbraniowych. Ich powierzchnię budują utwory piaszczyste.

8. Równia zalewowa dopływów Wisły (rzd). Powierzchnie te budują na analizowanym odcinku utwory spoiste. Zawartość frakcji ilowej wynosi w nich od 13 do 48%. Średnia zawartość substancji organicznej nie przekracza 2,2%. Utwory te bogate są w tlenki i wodorotlenki żelaza autogenicznego.

9. Taras plejstoceni (ost). Osady budujące powierzchnie tej formy charakteryzują się najmniejszą zawartością frakcji ilowej oraz najmniejszą zawartością substancji organicznej (rys. 2). Są one ponadto bezwęglanowe.

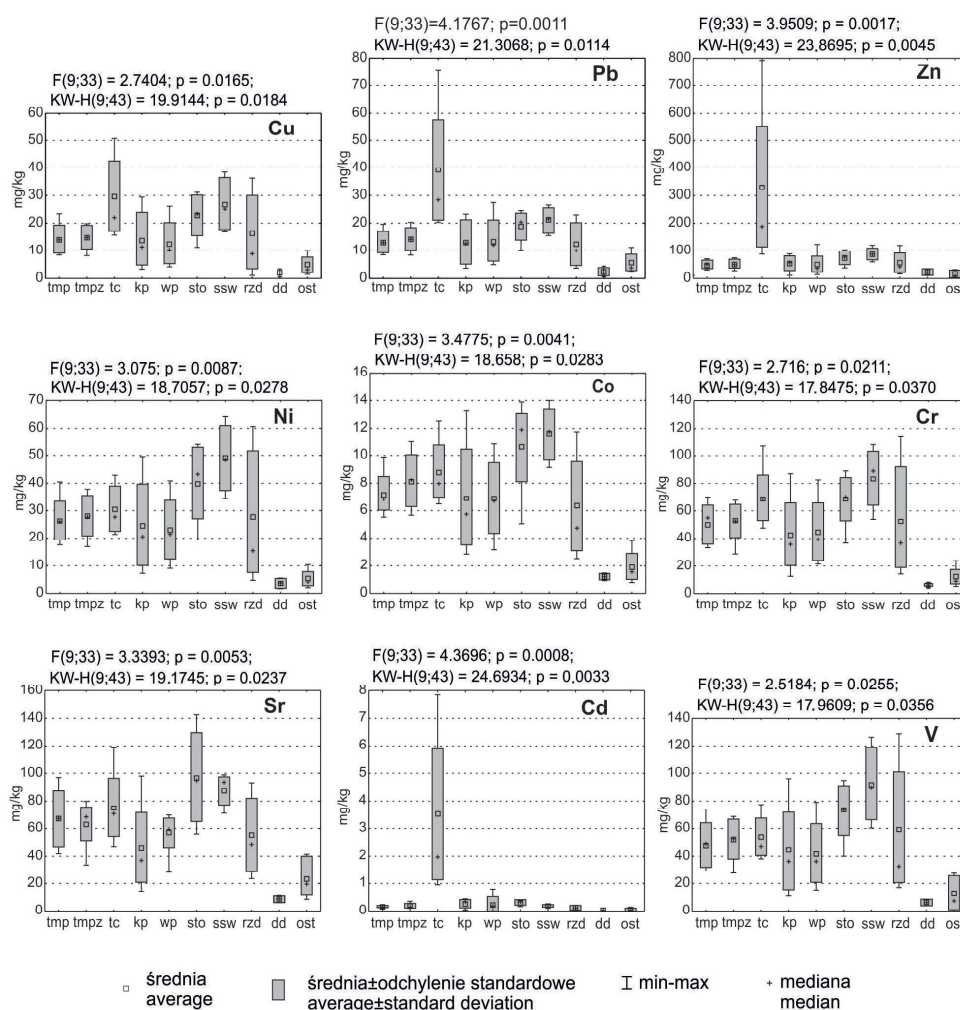
Minerały ilaste zawarte w osadach powodziowych Wisły na badanym odcinku to głównie smektyty, obok których występują w mniejszej ilości kaolinit, illit oraz minerały mieszanopakietowe.

Koncentracje pierwiastków śladowych w badanych próbkach są wyższe od tła przedstawionego na mapach geochemicznych Polski (Lis i inni, 1997). W obrębie analizowanego odcinka do-

liny Wisły rozkład tych elementów jest nierównomierny (rys. 4). Analiza CA grupuje pierwiastki śladowe zgodnie z wydzielonymi w trakcie analiz geomorfologicznych formami rzeźby terenu (rys. 5).

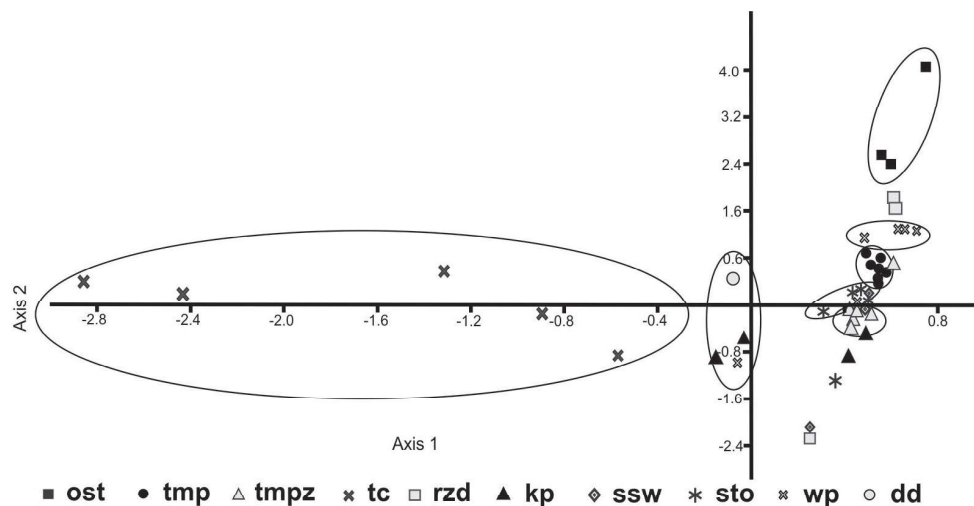
Najwyższe koncentracje Cu, Pb, Zn i Cd występują w osadach współczesnej

równi zalewowej (tc), na co wskazują zarówno wartości średnie, jak i mediany, choć rozrzut wyników jest w tej grupie relatywnie duży. Wysokie koncentracje tych samych metali (Cu, Pb, Zn i Cd) stwierdzono również w utworach budujących strefę stagnacji wód (ssw), które zawierają ponadto największe zawartości



RYSUNEK 4. Zawartość pierwiastków śladowych w osadach doliny Wisły analizowanego odcinka (Falkowska i inni, 2016, zmienione)

FIGURE 4. Trace metal concentrations in deposits of the Vistula river valley analysed (Falkowska et al., 2016, modified)



RYSUNEK 5. Nietendycyjna analiza zgodności (DCA) dla badanych metali ciężkich (Falkowska i inni, 2016, zmienione)
 FIGURE 5. Detrended analysis (DCA) of investigated trace metals (Falkowska et al., 2016, modified)

Ni, Co, V, Cr i Ba. Podobnie największe zawartości Sr stwierdzono w utworach wypełniających starorzecza (sto) oraz strefy stagnacji wód (ssw). Najniższe koncentracje wszystkich analizowanych pierwiastków śladowych występują w osadach tarasu plejstocenijskiego (ost) oraz w deltowych strefach depozycji (dd).

Na uwagę zasługuje fakt bardzo dużego zróżnicowania oznaczonych zawartości Zn, Cd, Pb w obrębie osadów współczesnej równi zalewowej (tc).

Dyskusja

Określona na podstawie analizy DTM i badań terenowych złożoność rzeźby powierzchni równi zalewowej odpowiada zróżnicowaniu zawartości pierwiastków śladowych w osadach budujących poszczególne, wydzielone formy. Zarówno statystyka Anova, jak

i statystyka nieparametryczna Kruskal–Wallisa, zestawione dla osadów zgrupowanych zgodnie wydzielonymi formami rzeźby równi zalewowej, wykazują istotność tego podziału dla wszystkich analizowanych pierwiastków (rys. 4).

Największe zawartości pierwiastków śladowych w madach współczesnej, proksymalnej równi zalewowej (tc) wynikają z dynamiki tego środowiska. Zalewy są w tej ograniczonej wałami przeciwpowodziowymi strefie częstsze i dłużej trwają, a poziom wód w czasie zalewów jest wyższy. Większe jest tu zatem współcześnie niż przed wybudowaniem wałów natężenie depozycji zawiesiny. Fakt ten wpłynął na większą zawartość frakcji ilowej i substancji organicznej oraz CaCO₃. Duże zawartości Cd oraz Cu wskazują na obecność zanieczyszczeń rolniczych docierających do koryta ze spływem powierzchniowym, natomiast duże zawartości Zn i Pb wskazują na wpływ zrzutów kopalnianych

z obszaru górniczego Śląska (współczesnych i redeponowanych) (Falkowska i Falkowski, w druku).

Podobnie wysokie koncentracje pierwiastków śladowych, szczególnie Cr, V, Sr, Ba, Ni, Cu, Pb i Zn stwierdzone zostały w strefach stagnacji wód (ssw). Powstały one w warunkach spokojnej sedymentacji z zawiesiny materiału ilastego z dużą zawartością substancji organicznej. Powstanie tych stref związane jest z nadbudowywaniem strefy korytowej i blokowaniem odpływu z powierzchni równi zalewowej. Poszczególne epizody takiej depozycji zaznaczają się występowaniem w profilu serii utworów organiczno-ilastych. Okresy takie przerywane były epizodami bardziej dynamicznej depozycji związanej z zalewami wezbraniowymi. Czynnikiem sprzyjającym powstawaniu takich zalewów była obecność w strefie korytowej wspomnianych wcześniej progów w powierzchni podłoża aluwii. Powodują one piętrzenie wód w korycie oraz wpływają na kierunek i dynamikę przepływu po powierzchni równi zalewowej (Falkowska i Falkowski, w druku).

Podobne koncentracje pierwiastków śladowych, związane z zawartością substancji organicznej w osadach wezbraniowych, stwierdzono w utworach wypełniających starorzecza (sto). Osady te to głównie torfy zawierające dużo części mineralnych. W starorzeczach tworzących ciągi obniżen w powierzchni równi zalewowej w czasie zalewów dochodziło często do koncentrowania przepływu, przenoszącego duże ilości materiału mineralnego.

Stosunkowo najmniejsze zróżnicowanie koncentracji pierwiastków śladowych stwierdzono w osadach budujących

tę część równi zalewowej, która uformowana była w okresie optimum klimatycznego holocenu, a została jedynie przemodelowana przez współczesne przeływy wezbraniowe (tmp i tmpz). Nieco wyższe koncentracje występują w tej części formy, która charakteryzuje się gładką powierzchnią (tmpz). Można wiązać to z większą zawartością frakcji ilowej w osadach, deponowanych tu w warunkach długotrwałych i spokojnych zalewów. W części tmp o mniej wyrównanej powierzchni, w której poza śladami migracji koryta meandrowego rozpoznawalne są także ślady krótkich i dynamicznych przepływów wezbraniowych powodujących erozję gliniastych mad, stwierdzana była niższa koncentracja pierwiastków śladowych.

Stwierdzone w obrębie stref skoncentrowanego przepływu (kp) koncentracje pierwiastków śladowych nie odbiegają od wartości uzyskanych dla większości form. Sytuacja taka jest wynikiem zmian charakteru depozycji, jakie przebiegają na powierzchni równi zalewowej od czasu wybudowania wałów przeciwpowodziowych. Dzięki nim, współczesne zalewy związane są wyłącznie z wysokimi stanami w dopływach Wisły albo z awariami wałów przeciwpowodziowych. Woda z takich zalewów wolno spływa z powierzchni równi zalewowej, co sprzyja depozycji najdrobniejszych frakcji (Falkowska i Falkowski, w druku).

Stwierdzone różnice w zawartościach pierwiastków śladowych między osadami wałów przykorytowych (wp) w rejonie Basonii i Sulejowa (południowa część analizowanego terenu) a osadami z okolic Solca nad Wisłą (część północna) wynikają z różnic dynamiki tych

środowisk. Pierwsze związane są z incydentalnymi, skoncentrowanymi przepływami po powierzchni równi zalewowej. Drugie powstały w związku z przechodzeniem fali wezbraniowej aktywnym korytem współczesnej Wisły.

Najmniejsze zawartości pierwiastków śladowych stwierdzono w osadach budujących występujące w obrębie równi zalewowej powierzchnie ostańców tarasu plejstoceniowego (ost). Wody wezbraniowe wkraczały na te powierzchnie jedynie w czasie wyjątkowo dużych wezbrań, nie powodując powstania znaczącej miąższości holoceniowych mad. Równie małe zawartości pierwiastków śladowych stwierdzono w osadach piaszczystych odsypów budujących strefy depozycji deltowej (dd). Wynikają one z niewielkiej zawartości frakcji ilastej i substancji organicznej. Pierwiastki śladowe tam występujące wiążane są jedynie w tlenkach i wodorotlenkach żelaza.

Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań dowodzą znaczenia identyfikacji morfodynamiki równi zalewowej w ocenie rozmieszczenia pierwiastków śladowych w osadach wezbraniowych. Waga tego typu analiz geomorfologicznych jest szczególnie duża w przypadku środowiska takich dolin rzecznych, które nie mają w pełni wykształconego cokołu erozyjnego, ponieważ oddziaływanie kulminacji trudno rozmywalnego podłoża współczesnych aluwiiów korytowych wpływa na różnicowanie dynamiki strumienia wód wezbraniowych (Falkowski, 2007; Falkowska, Falkowski, 2015). Zjawisko to powoduje znaczące różni-

cowanie środowisk depozycji utworów pozakorytowych.

Przeprowadzone badania wykazały także dużą przydatność numerycznego modelu terenu (DTM/NMT) w identyfikacji form rzeźby powierzchni równi zalewowej. Realizacja większości analiz hydrologicznych z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu jest w chwili obecnej procedurą dość prostą do realizacji z punktu widzenia operatora. Nadal jednak konieczna jest niezbędna wiedza do interpretacji wyników analizy oraz oszacowania wartości progowych dla końcowej klasyfikacji cieków. Utworzona powierzchnia terenu charakteryzuje się często bardzo subtelnym reliefem, który może być zapisem często złożonej morfogenezy. Wykorzystanie DTM/NMT pozwala na identyfikacje granic różnego rzędu form rzeźby równi zalewowej i korelowanie ich z wynikami badań sedymentologicznych, geochemicznych i innych.

Literatura

- Appleton, J.D. i Adlam, K.A.M. (2012). Geogenic control on soil chemistry in urban areas: A novel method for urban geochemical mapping using parent material classified data. *Applied Geochemistry*, 27, 161-170.
- Falkowski, E. (1967). Evolution of the Holocene Vistula from Zawichost to Solec with an engineering-geological prediction of further development. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, "Z badań geologiczno-inżynierskich w Polsce", 198, 57-148.
- Falkowski, T. (2007). Alluvial bottom geology inferred as a factor controlling channel flow along the Middle Vistula River, Poland. *Geological Quarterly* 51, 91-102.
- Falkowska, E. i Falkowski, T. (2015). Trace metals distribution pattern in floodplain sediments of a lowland river in relation to

- contemporary valley bottom morphodynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 876-887.
- Falkowska, E. i Falkowski, T. (w druku). Floodplain morphodynamics and the distribution of trace metals in overbank deposits, Vistula River Valley Gorge near Solec, Poland. *Acta Geologica Polonica*.
- Falkowski, T. i Popek, Z. (2000). Zones of ice-jams formation on the Middle Vistula River reach in relation to variable of river valley morphology. *Annals of Warsaw Agricultural University, Land Reclamation* 30, 77-90.
- Ferreira da Silva, E., Freire Ávila, P., Salgueiro, A.R., Candeias, C. i Garcia Pereira, H. (2013). Quantitative-spatial assessment of soil contamination in S. Francisco de Assis due to mining activity of the Panasqueira mine (Portugal). *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 7534-7549.
- Gębica, P. (2004). The course of fluvial accumulation during the Upper Vistulian in Sandomierz Basin. *Prace Geograficzne 193, PAN, IGiPZ*, 1-229.
- Greenacre, M.J. (1984). Theory and applications of correspondence analysis. Academic Press, London.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G. i Miller, J.P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. San Francisco: Freeman & Company.
- Lis, J., Pasieczna, A., Strzelecki, R., Wołkowicz, S. i Lewandowski, P. (1997). Geochemical and radioactivity mapping in Poland. *Journal of Geochemical Exploration*, 60, 39-53.
- Lopez, P., Navarro, E., Marce, R., Ordoñez, J., Caputo, L. i Armengol, J. (2006). Elemental ratios in sediments as indicators of ecological processes in Spanish reservoirs. *Limnetica*, 25, 499-512.
- Miller, J.R. i Orbock-Miller, S. (2007). *Contaminated Rivers: A Geomorphological-Geochemical Approach to Site Assessment and Remediation*. Dordrecht: Springer.
- Myślińska, E. (1984). Criteria for evaluation of engineering-geological properties of the mad. *Kwartalnik Geologiczny* 28, 143-162.
- Pan, Y., Weilla S., Ackerer, P. i Delay, F. (2015). A coupled stream flow and depth-integrated subsurface flow model for catchment hydrology. *Journal of Hydrology*, 530, 66-78.
- Požaryski, W. (1955). Fluvial deposits in the Vistula River gorge across the Southern Uplands. *Prace Instytutu Geologicznego 12c*, 1-96.
- Požaryski, W., Maruszczak, H. i Lindner, L. (1994). Chronostratigraphy of Pleistocene deposits and evolution of the Middle Vistula River with particular attention to the gap through the South Polish Uplands. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 148, 1-57.
- Romanek, A. i Zlonkiewicz, Z. (1993). *Geological Map of Poland in the scale of 1:200 000, map sheet Ostrowiec Świętokrzyski*, Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Sawicki, L. (1933). Contribution to the knowledge of diluvium and morphogenesis of the Vistula gorge near Pulawy. *Przegląd Geograficzny*, 13.
- Starkel, L. (1983). The reflection of hydrologic changes in fluvial environment of the temperate zone during the last 15 000 years. W: J. Gregory (red.) *Background to Palaeohydrology*, Chichester: J. Wiley, 213-234.
- Vanderberghe, J. (2002). The relation between climate and river processes, landforms and deposits during the Quaternary. *Quaternary International*, 91, 17-23.
- Wasilewski, M. i Chormański, J. (2009). The Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model as an alternative data source for deriving hydrological characteristics in lowland catchment. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Land Reclamation*, 41, 71-82.
- Weilla, S., Altissimob, M., Cassianic, G., Deiana, R., Marañib, M. i Puttif, M. (2013). Saturated area dynamics and streamflow generation from coupled surface-subsurface simulations and field observations. *Advances in Water Resources*, 59, 196-208.

Streszczenie

Wykorzystanie numerycznego modelu terenu (NMT) w analizie zróżnicowania facjalnego osadów wezbraniowych Wisły między Basonią a Solcem nad Wisłą oraz jego znaczenia dla koncentracji metali ciężkich. Celem pracy było określenie przy-

datności cyfrowego modelu terenu (NMT) do identyfikacji zróżnicowania środowisk depozycji współczesnych utworów wezbraniowych, a także określenie związku między poszczególnymi strefami morfodynamicznymi równi zalewowej a koncentracją metali ciężkich w osadach powierzchniowych. Badania prowadzono na odcinku doliny środkowej Wisły w obrębie jej Małopolskiego Przełomu. Poszczególne strefy morfodynamiczne były identyfikowane z wykorzystaniem analizy numerycznego modelu terenu o rozdzielczości 10 m oraz na podstawie wyników badań terenowych. Położenie granic wychodni i form rzeźby równi zalewowej określono w terenie, wykorzystując odbiorniki kodowe DGPS. W trakcie badań pobrano 110 próbek osadów wezbraniowych. Charakterystyka litologiczna obejmowała analizę granulometryczną, oznaczenie zawartości CaCO₃, składu mineralnego frakcji ilowej, a także zawartości substancji organicznej. Badano zawartość Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Sr, Cd i V oraz stosunek Fe do Al. Wyniki oznaczeń laboratoryjnych poddane zostały analizie statystycznej. Otrzymane zróżnicowanie zawartości metali ciężkich w osadach wezbraniowych koresponduje z wydzielonymi dziewięcioma typami form rzeźby równi zalewowej Wisły.

Summary

The use of digital elevation model (DTM) in the facies differentiation analysis of flood sediments of the Vistula river between Basonia and Solec upon Vistula and its importance for the concentration of heavy metals. The aim of the study was to determine the usefulness of the digital terrain model (DTM) for identification the diversity of depositional environments of contemporary flood alluvia, as well as to determine

the relationship between the individual morphodynamic floodplain zones and concentration of heavy metals in surface sediments. Studies were carried out in the section of the Middle Vistula valley within its Małopolska Gorge. Individual morphodynamic zones were identified in the base of the analysis of digital elevation model (DEM) with a resolution of 10 m, as well as the results of field research. Detailed location of outcrop boundaries as well as floodplain landforms boundaries was carried out with the usage of DGPS receivers. During the study, 110 samples of flood deposits were collected. Lithologic characteristic included granulometric analysis, determination of CaCO₃ content, mineral composition of clay fraction and the content of organic matter. The content of Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr, Sr, Cd and V, and the ratio Fe to Al were determined. The results of laboratory tests were subjected to statistical analysis. The resulting differences in the content of heavy metals in flood deposits corresponds to distinguished nine types of floodplain landforms.

Author's address:

Ewa Falkowska
Uniwersytetu Warszawski
Wydział Geologii
00-086 Warszawa, ul. Żwirki i Wigury 93,
Poland
e-mail: ewa.falkowska@uw.edu.pl

Tomasz Falkowski
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
SGGW
02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 166,
Poland
e-mail: tomasz_falkowski@sggw.pl

Michał Brach
Wydział Leśny SGGW
02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 166,
Poland
e-mail: michal.brach@wl.sggw.pl