

Litodynamiczna interpretacja środowiska fluwialnego na podstawie wskaźników uziarnienia – przegląd wybranych metod

Lithodynamic interpretation of fluvial environment based on grain size composition's parameters – review of selected methods

Jacek B. Szmańda*

*Instytut Geografii, Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy Jana Kochanowskiego w Kielcach,
ul. Świętokrzyska 15, 25-406 Kielce*

Zarys treści: W artykule omówiono wybrane metody interpretacji litodynamicznej środowiska fluwialnego. Przedstawiono metody oceny rangowej energii prądu, metody analizy trendów sedymentacyjnych w zakresie zmian wskaźników uziarnienia w procesie sedymentacji fluwialnej, modele interpretacji morfodynamicznej i transportu ziaren. Metody te zostały poddane ocenie merytorycznej na wybranych przykładach badań własnych i literatury.

Słowa kluczowe: aluwia, wskaźniki uziarnienia, interpretacja środowisk sedymentacji, analiza trendów sedymentacji, reżim energetyczny przepływu, strefy morfogenetyczne.

Abstract: The grain size parameters (mean size, sorting, skewness, kurtosis, median and first percentile) could be used for the lithodynamic interpretation of fluvial environment. Dependency between a particle size and a sedimentologic condition in the fluvial environment have been defined (Ruby, 1933; Hjulström, 1935; Morris, 1957; Poole, 1957; Aipołow, 1963; Passega, 1964; Sundborga, 1967; Royse, 1968; Braithwaite, 1973; Southard and Boguchwal; 1973, Baker 1974; Kaniecki, 1976; Miller et. al, 1977; Koster, 1978; Middleton and Southard, 1978; Baba and Komar, 1981; Froehlich, 1982; Costa, 1983; Williams, 1983; Eschner and Kichner, 1984; Młynarczyk, 1985; Maizels, 1989; O'Connor, 1993; Mazumder 1994; Le Roux 1977, 2002; Ferguson and Church 2004). Shear and settlement velocity could be calculated on the base of the grain size. Sediment trend analysis will be used to the change of a grain size composition during erosion, transport and accumulation. Condition of the grain transport (traction, saltation and suspension) and energy flow regime will be evaluated on the based of the grain size parameters dependency diagrams. With the use of these diagrams the morphodynamic zones (erosion, balance and deposition) could be estimated. Selected methods of the fluvial environment lithodynamic interpretation were collected and decrypted in this article.

Key words: alluvia, grain size composition parameters, sedimentological conditions interpretation, sediment trend analysis, energy flow regime, morphogenetic zone

* e-mail: j.szmanda@ujk.edu.pl

Wprowadzenie

Liczne badania prowadzone od lat 30. XX w. dowodzą, że o warunkach sedymentacji fluwialnej można wnioskować na podstawie wielkości i kształtu ziarna (m.in. Ruby, 1933; Hjulström, 1935; Morris, 1957; Poole, 1957; Braithwaite, 1973; Southard, Boguchwal, 1973; Baker, 1974; Kaniecki, 1976; Baba, Komar, 1981; Froehlich, 1982; Eschner, Kichner, 1984; Młynarczyk, 1985; Antczak, 1986; Mazumder, 1994; Le Roux, 1977; 2002; Ferguson, Church, 2004).

Wskaźniki uziarnienia wyznaczane na podstawie różnych metod (Folk, 1964; Grzegorzczak, 1970; Racinowski i in., 2001) charakteryzują rozkład wielkości ziaren w osadach. Mogą być także wykorzystywane do interpretacji warunków sedymentacji w środowisku fluwialnym (Gradziński i in., 1976; 1986; Racinowski i in., 2001; Mycielska-Dowgiałło, 2007). Najczęściej stosowanymi są parametry: średniej średnicy ziarna, wysortowania, skośności i kurtozy. Wyliczane są one w jednostkach phi, metodą momentów (Wentworth, 1929; Krumbein, 1936) oraz wyznaczane metodą graficzną na podstawie krzywych kumulacyjnych wg wzorów Folka i Warda (1957). W badaniach lito-dynamicznych stosowane są ponadto wartości percentyli: pierwszego percentyla (D_1 , C) i mediany (D_{50} , M, Md). Na podstawie wskaźników uziarnienia aluwii można dokonać pośredniej oceny prędkości rangowych przepływu: prędkości ścinającej (erozyjnej) i depozycyjnej. Ocena ta polega między innymi na obliczaniu wartości prędkości prądu, przy których nastąpiła depozycja ziaren w badanym osadzie w oparciu o formuły matematyczne. Ponadto, do wyznaczania prędkości, przy których następuje uruchomienie, transport lub depozycja ziaren służą diagramy wykreślone na podstawie badań eksperymentalnych. W oparciu o zestawienie wartości wskaźników statystycznych uziarnienia na diagramach zależności można opisywać warunki reżimu przepływu oraz czynniki determinujące powstanie osadu czyli: warunki erozyjne, transportowe i depozycyjne lub sposób transportu ziaren poprzedzający depozycję.

Określanie prędkości rangowych przepływu rzeczno-

Przez prędkości rangowe przepływu rzeczno-

rozumie się charakterystyczne prędkości jakie wy-

stępują w środowisku fluwialnym, które warunkują uruchomienie lub akumulację ziaren (Racinowski i in., 2001; Mycielska-Dowgiałło, 2007). Przyjmuje się, że na podstawie wartości przeciętnej średnicy ziarna lub mediany można wyznaczać prędkości poniżej których następuje depozycja materiału, a powyżej których odbywa się masowy ruch ziaren w warunkach transportu przydennego oraz zawieszonowego. Natomiast na podstawie wartości pierwszego percentyla można wyznaczyć tzw. kompetencję środowiska transportującego (Royse, 1968) czyli najmniejszą prędkość prądu potrzebną do uruchomienia najgrubszego ziarna w osadzie.

Do wyliczania prędkości depozycyjnych można zastosować wzory opracowane przez różnych autorów (tab. 1). We wzorach tych jako zmienną wprowadza się wartość mediany, ewentualnie przeciętnej średnicy ziarna, niezależnie od metody jej wyznaczania. Mediana i średnia średnica ziarna (M_z i M_1) mają bowiem na tyle zbliżone wartości (Racinowski i in., 2001), że przy szacowaniu depozycyjnej prędkości rangowej mogą być stosowane zamiennie. Wartości prędkości depozycyjnych można także odczytać z diagramu Sundborga (1967), na podstawie linii granicznej prędkości przemieszczania (ang. *cessation of movement*) – ryc. 1, ograniczającej pola transportu dennego i zawieszonowego (A, B) od pola braku transportu (D). Do tego diagramu Allen (1965) wprowadził także linię prędkości depozycyjnej. Linia ta oddziela pole braku ruchu (D) od pola depozycji materiału zawieszonowego (C) i dotyczy ziaren o średnicy większej niż 0,1 mm. Autor ten nie wyjaśnia szerzej znaczenia interpretacyjnego modyfikacji wprowadzonych przez siebie do diagramu Sundborga (1967).

Ocena kompetencji środowiska fluwialnego może polegać na odczytaniu wartości prędkości przepływu poprzez rzutowanie wartości pierwszego percentyla na linię krytycznej prędkości erozyjnej (ang. *critical erosion velocity*) na diagramie Sundborga (1967) – ryc. 1. Określona w ten sposób miara rangowa przepływu oznacza najmniejszą prędkość jaka była niezbędna do uruchomienia największego ziarna w badanym osadzie. W przypadku populacji próbek aluwii reprezentujących określoną jednostkę sedymentacyjną, powinno się wykonać interpretację największej wartości średnicy pierwszego percentyla spośród badanych próbek.

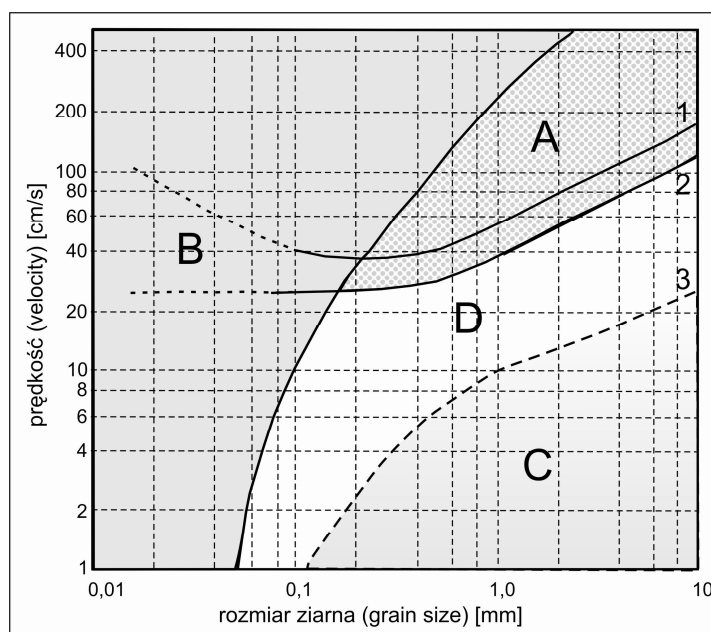
Tabela 1. Wzory do obliczania średnich prędkości depozycyjnych
Table 1. Formulas for calculation of mean settlement velocity

Metoda	Wzór	Jednostka D_{50}	Jednostka prędkości
Aipołow (1963)	$v = 5,1 \sqrt{D}^{1,33}$	[cm]	$[m s^{-1}]$
Miller i in. (1977)	$v = 160 D^{0,45}$	[cm]	$[cm s^{-1}]$
Koster (1978)	$v = 49 D^{0,381}$	[cm]	$[cm s^{-1}]$
Costa (1983)	$v = 5,9 D^{0,5}$	[cm]	$[cm s^{-1}]$
Williams (1983)	$v = 0,065 D^{0,5}$	[m]	$[m s^{-1}]$
O'Connor (1993)	$v = 0,29 D^{0,6}$	[m]	$[m s^{-1}]$

Zastosowanie diagramu Sundborga jest ograniczone tylko do interpretacji prędkości przepływów w cieczach newtonowskich, uniemożliwia więc także analizę przepływów o wysokiej koncentracji materiału wleczonego i zawieszonoego typu „*hyperconcentrated flow*”. Powstaje natomiast problem oceny warunków sedymentacji przy transporcie rumowiska typu przepływu gruzowego (ang. *debris flow*), który jak wynika z badań między innymi Teisseyre'a (1985, 1988), Costy (1987) i Froehlich (1998) występuje w czasie wezbrań w dolinach rzecznych nie tylko w korytach rzek, ale także na równinach zalewowych.

Należy zwrócić uwagę, że uzyskiwane wartości prędkości depozycyjnej na podstawie wzorów zamieszczonych w tabeli 1 i diagramu Sundborga znacznie różnią się między sobą (ryc. 2). Dlatego przy publikowaniu wyników interpretacji bezwzględnie trzeba powoływać się na odpowiednie

źródło, na podstawie którego ją przeprowadzono. Uzasadnione jest także podanie wartości skrajnych z wyników obliczeń. Jak wykazały bowiem badania, między innymi Middeltona i Southarda (1978), Ashley (1990), Southarda i Boguchala (1990), aluwia o tej samej przeciętnej średnicy ziarna i strukturze powstają przy różnych prędkościach przepływu (ryc. 3). Ponadto w interpretacji litodynamicznej bardzo ważna jest analiza struktur sedymentacyjnych, ponieważ aluwia o tej samej przeciętnej średnicy ziarna, a o odmiennej strukturze mogą powstawać w warunkach istotnie różniących się pod względem warunków przepływu. Przykładowo, aluwia o przeciętnej średnicy ziarna 1 mm warstwowane horyzontalnie (tworzące dolne zrównane dno) postają przy prędkościach 0,4-0,5 $m s^{-1}$, natomiast warstwowane przekątnie płasko (struktury typowe dla wydmy podwodnych) powstają przy prędkościach 0,5-1,5 $m s^{-1}$

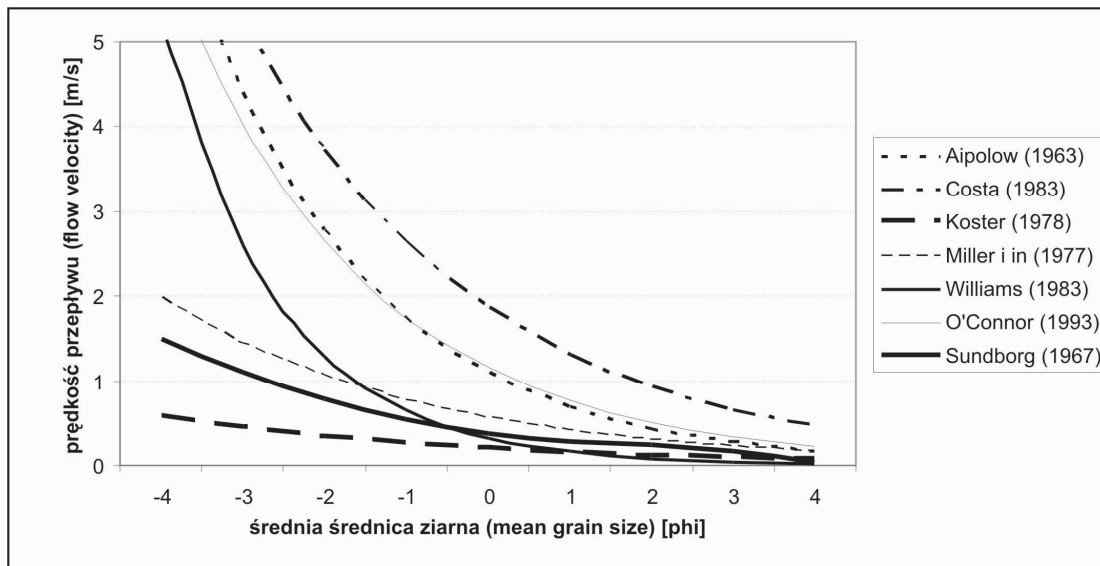


Ryc. 1. Diagram zależności pomiędzy prędkością przepływu, rozmiarem ziarna i stanem ruchu jednorodnego materiału o gęstości $2.65 g/cm^3$, wg Sundborga (1956, 1967) zmodyfikowany przez Allena (1965).

1 – krytyczna prędkość erozyjna, 2 – graniczna prędkość przemieszczania, 3 – prędkość depozycyjna wg Allena (1965). A – pole transportu ładunku dennego, B- pole transportu ładunku zawieszonoego, C – pole depozycji materiału zawieszonoego wg Allena (1965), D – pole braku ruchu ziaren

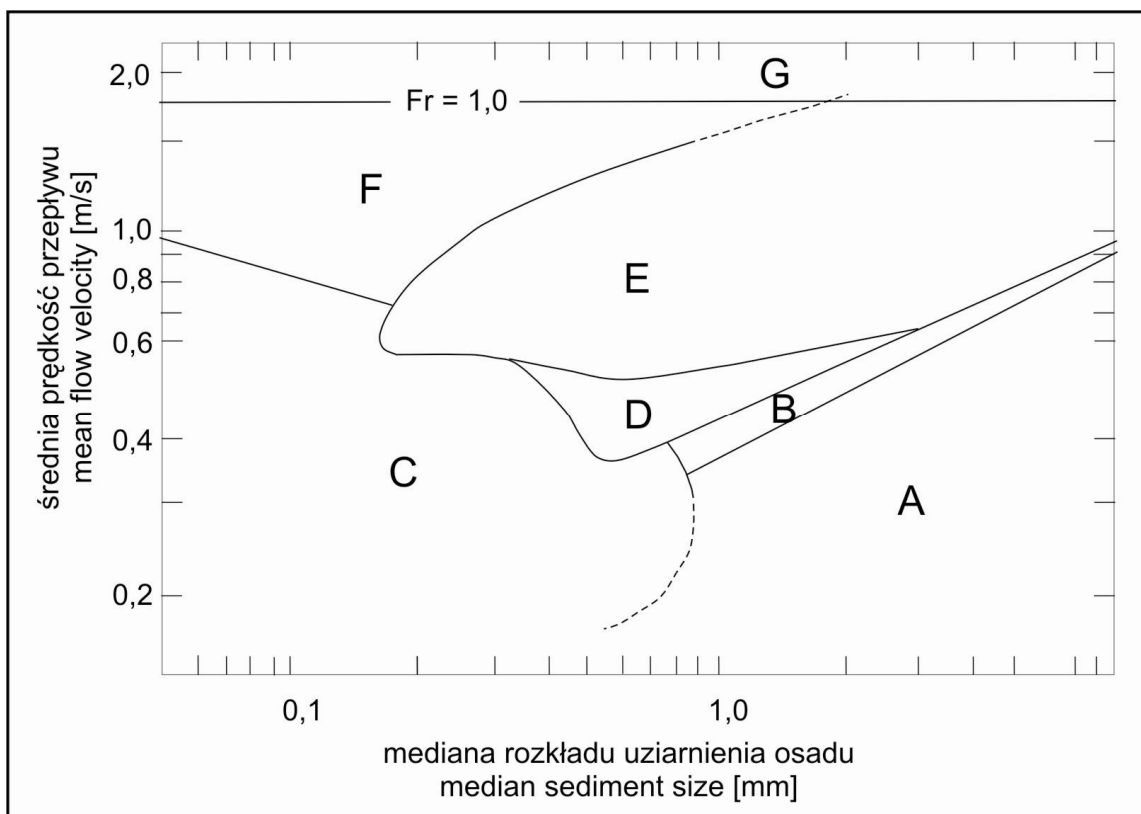
Fig. 1. Diagram of relation between flow velocity, grain size and state of sediment movement for uniform material of density $2.65 g/cm^3$, after Sundborg (1956, 1967) modified by (Allen 1965).

1 – critical erosion velocity, 2 – cessation of movement, 3 – settlement velocity (after Allen 1965). A – Bed load transport field, B - Transport of suspended material field, C – Deposition of suspended material field (after Allen 1965), D – No movement field



Ryc. 2. Diagram zależności pomiędzy prędkością depozycyjną i średnią średnicą rozkładu uziarnienia próbki osadu wg różnych autorów

Fig. 2. Diagram of settlement velocity dependency against mean grain size composition of deposits sample, after different authors



Ryc. 3. Diagram zależności prędkości przepływu i mediany aluwiołów oraz form dna, wg Middeltona, Southarda (1978), Ashley (1990) i Southarda, Boguchwała (1990) zmienione. Parametry prędkości i wielkości ziarna zostały wystandaryzowane do temperatury wody 10°C średniej głębokości 0,25-0,4 m.

A – brak ruchu ziaren, B – dolne płaskie dno, C – riplemarki, D – fale piaskowe E – wydmy, F – górne płaskie dno, G – antywydmy.

Fig. 3. Diagram of mean flow velocity dependency against median sediment size and bed forms after Middelton, Southard (1978) Ashley (1990) and Southarda, Boguchwała (1990) changed. The velocity and grain size parameters have been standardized to 10°C of water temperature and mean flow depth of 0,25-0,4 m.

A – no movement, B – lower plane, C – ripples, D – sandy waves E – dunes, F – upper plane, G – antidunes.

Z przytoczonego diagramu zależności mediany od prędkości przepływu (ryc. 3), na podstawie wartości mediany lub średniej średnicy ziarna, można dokonać oceny nie tylko prędkości depozycyjnych dla osadów o określonej strukturze, typowej dla form dna w korytach rzecznych (riplemarków, wydm, antywydm, górnego i dolnego płaskiego dna), ale także określać ustrój prądu, na podstawie liczby Frouda: prąd spokojny – ruch podkrytyczny ($Fr < 1$), prąd rwący – ruch nadkrytyczny ($Fr > 1$).

Niektóre ze wzorów, wymienionych w tab. 1, zastosował Zieliński (1989, 1992) w interpretacji warunków sedymentacji osadów i paleohydrauliki przepływów sandrowych w Polsce północno-wschodniej i na Górnym Śląsku. W badaniach osadów rzek roztokowych na sandrach mazurskich Zieliński (1993) określił prędkości depozycyjne litotypów żwirowych, które zawierały się pomiędzy $1-5 \text{ m s}^{-1}$, a litotypów piaszczystych w zakresie od 0 do $2,1 \text{ m s}^{-1}$. Ponadto przeprowadzona analiza umożliwiła mu uszeregowanie litotypów koryt sandrowych według malejącej energii środowiska, od bardzo głębokich koryt katastrofalnych wezbrań ($1-5 \text{ m s}^{-1}$) do płytkich i rozległych koryt o płaskim dnie ($1,7-2,2 \text{ m s}^{-1}$). W przypadku żwirodennych litotypów roztokowych rzek sandrowych uszeregował linotypy, od głębokich koryt piaskodennych z wielkimi rozmyciami dna ($1,8-2,1 \text{ m s}^{-1}$) do niskoenergetycznych płytkich rzek roztokowych lub przykorytowej równiny zalewowej ($0-1,2 \text{ m s}^{-1}$).

Przeprowadzona przez mnie i współautorów (Molewski i in., 2005), przy użyciu wzoru Kostera (1978), analiza paleoprędkości depozycyjnych osadów terasy kemowej położonej w strefie marginalnej lodowca Tungraárjökull na Islandii wykazała, że osady litofacji mułkowej (Fh, Fw, Fh/FSh, Fw/FSw) i mułkowo-piaszczysty (SFm, FSh, FSr, FSr) powstawały przy prędkościach prądu zawierają się w przedziale od $4,9 \text{ cm s}^{-1}$ do $9,2 \text{ cm s}^{-1}$. Natomiast osady litofacji żwirowych (Gh, GSh i SGh) przy prędkościach około $0,3-0,4 \text{ m s}^{-1}$. Maksymalna kompetencji środowiska (MPS), została oszacowana na podstawie piątego percentyla. Obliczona z wzoru Kostera prędkość prądu dla MPS wynosi zaledwie $1,4 \text{ m s}^{-1}$, co z obecnej perspektywy trudno uznać za wiarygodne. Na tej podstawie można sądzić, że wzór Kostera (1978), o ile może być użyteczny w obliczaniu prędkości depozycyjnych, to nie powinien być stosowany do określania kompetencji środowiska fluwialnego.

Badania kompetencji środowiska prowadziłem także na podstawie osadów małych zbiorników młyńskich (Pogórski, Szymańda, 2000; 2004). W tym przypadku prędkości erozyjne określałem na

diagramie Sundborga (1967). Oszacowane w ten sposób prędkości wynosiły nie mniej niż $1,5 \text{ m s}^{-1}$. Przy pomocy diagramu Sundborga maksymalne prędkości prądu na podstawie aluwiiów powodziowych Parsęty określał również Zwoliński (1985), który uznał, że prędkości zdolne do transportu najgrubszego ziarna, z których zbudowane były pokrywy piaszczyste, wynosiły nie mniej niż $1,3 \text{ m s}^{-1}$.

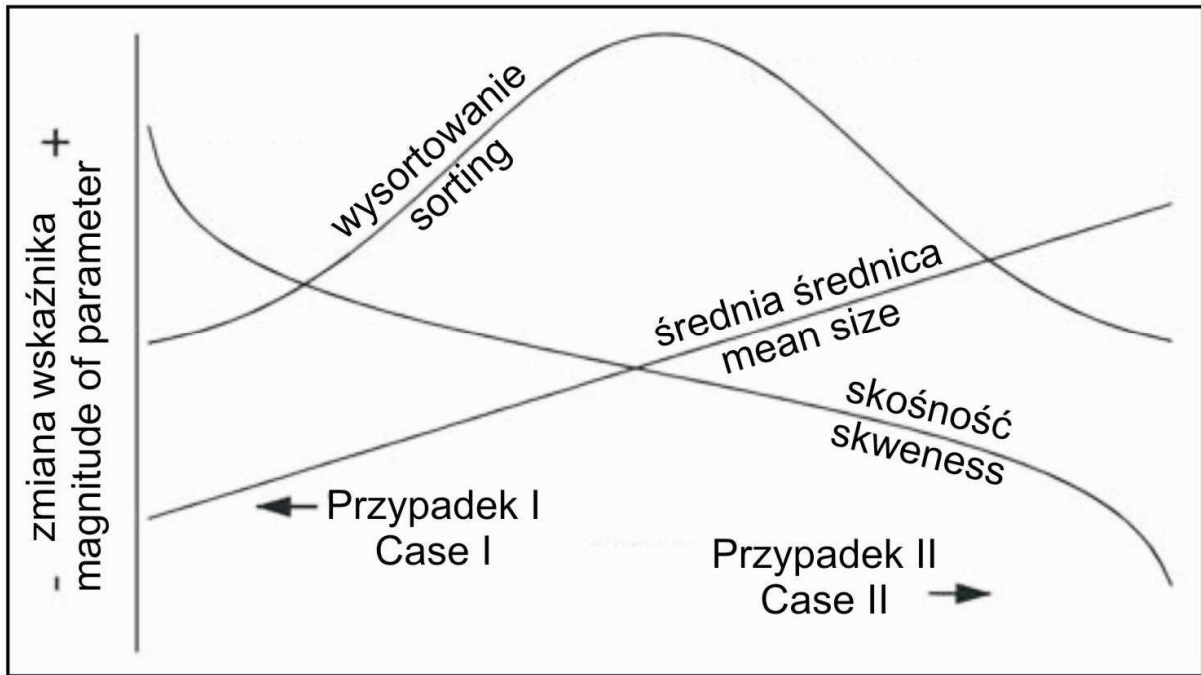
Ostatnio przeprowadziłem interpretację prędkości depozycyjnych i kompetencji środowiska przepływów pozakorytowych przy pomocy opisanych metod, na przykładzie aluwiiów pozakorytowych Dunaju w Bratysławie (Szymańda, 2009). Uzyskane wyniki oceny kompetencji środowiska wykazały, że najbardziej energetyczne przepływy związane są z akumulacją żwirów o zwartym szkieletcie ziarnowym (Gm) i diamiktonów powodziowych (Dm) – prędkość ścinające nie mniejsze niż 3 m s^{-1} , natomiast najmniej energetyczne związane są z transportem pojedynczych ziaren drobnoziarnistego piasku (ok. 3 phi) w litofacji masywnych mułkowiłastych (Fm) – przy prędkościach około 30 cm s^{-1} . Depozycja osadów żwirowych odbywała się przy w warunkach prądu burzliwego o prędkościach w zakresie $40-60 \text{ cm s}^{-1}$, a mułkowo-iłastych przy stanie prądu spokojnego o prędkości nie przekraczającej 4 cm s^{-1} .

Analiza trendów sedymentacji

Analiza trendów sedymentacji osadów (STA – Sediment Trend Analysis), polega na badaniu zmian rozkładów uziarnienia, które następują pod wpływem erozji, transportu i depozycji osadów. Zagadnieniami tymi, w zakresie środowiska fluwialnego zajmowali się m.in.: Mc Laren, (1981), Mc Laren i Bowles (1985), Gao i Collins (1992), Le Roux (1994, 2002), Mohd-Lokman i in. (1998), Asselman, (1999), Le Roux, Rojas (2007), Myciel-ska-Dowgiałło (2007).

Ze względu na ograniczoną objętość artykułu scharakteryzuję krótko tylko trzy metody STA stosowane w badaniach fluwialnych:

Pierwsza z metod zaproponowana przez Mc Laren i Bowles (1985) opisuje dwa przypadki zmian uziarnienia w warunkach transportu rzecznoego, przy zastosowaniu miar wyliczonych metodą momentów w jednostkach phi (ryc. 4). Przypadek pierwszy (I), polega na grubieniu aluwiiów, któremu towarzyszy polepszanie się wysortowania i zmiana rozkładów uziarnienia w kierunku rozkładu lewoskośnego (zarówno w oryginale jak i na rycinie 4 oznaczanego jako dodatni wg miary asymetrii stosowanej przez Mc Larena i Bowlesa).



Ryc. 4. Zmiana wskaźników uziarnienia aluwiiów wraz z transportem wg Mc Larena i Bowlesa (1985)

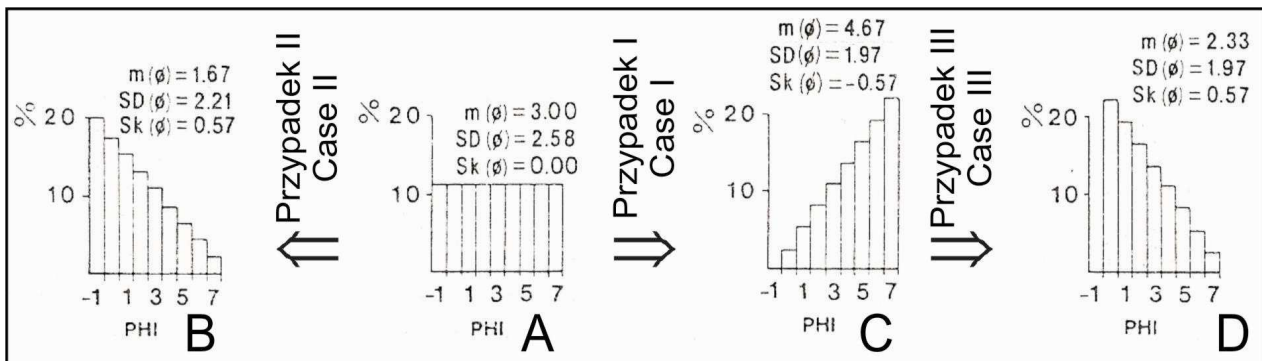
Fig. 4. Changes in grain size parameters along transport paths after Mc Laren and Bowles (1985)

Przypadek drugi (II) oznacza drobnienie aluwiiów połączone z polepszeniem się wysortowania i jednocześnie zmianą asymetrii na prawoskośną (na rycinie 1 oznaczony jako ujemną).

W tym miejscu warto zwrócić uwagę, na następującą prawidłowość. Wyliczone z danych uziarnienia w skali phi wartości wskaźnika asymetrii zarówno metodą momentów centralnych (np. przez Mc Larena i Bowlesa, 1985), jak i metodą Folka i Warda (1957) mają zwykle zbieżne wyniki pod względem znaku (dodatnie, ujemne), różnią się jednak znacznie między sobą wartościami bezwzględnymi (Raciniowski i in., 2001). Dla interpretacji litody-

namicznej istotne jest, że w osadach z przewagą ziaren grubszych od mediany (rozkłady lewoskośne) wskaźniki wyliczane w jednostkach phi mają wartości dodatnie. Natomiast w osadach z przewagą ziaren drobniejszych od mediany (rozkłady prawoskośne) mają wartości ujemne.

Jednak ze względu na słabą korelację wartości asymetrii wyliczanych tymi dwiema metodami w przypadku stosowania w tej metodzie STA wskaźników Folka i Warda, model Mc Laren i Bowles (1985) wymaga weryfikacji.



Ryc. 5. Zmiana rozkładu i wskaźników uziarnienia aluwiiów wraz z procesami fluwalnymi wg Mc Larena (1981).

Parametry statystyczne: m – średnia średnica, SD – wysortowanie, Sk – skośność. A, B, C, D – objaśniono w tekście

Fig. 5. Changes in grain size distributions and parameters along transport paths after Mc Laren (1981).

Statistical parameters: m – mean size, SD – sorting, Sk – skewness. A, B, C, D – explanation in text

Nawiązując do wcześniejszych badań Mc Larena (1981) – ryc. 5, model Mc Larena i Bowlesa przebiegu procesów sedymentacji fluwialnej objęty analizą trendu STA, należy rozumieć następująco:

(1) Przypadek II, transformacja osadu z A do B w wyniku erozji. Hipotetyczny osad źródłowy (A) ulega erozji w warunkach przepływu o kompetencji zdolnej do uruchomienia najgrubszych ziaren w nim występujących. Erozja ta polega na „wyplukaniu” drobnych frakcji i transformacji osadu źródłowego w bruk (B). Bruk ten ma cechy rozkładu uziarnienia bardziej gruboziarnistego, lepiej wysortowanego i lewoskośnego (dodatnie wartości wskaźnika Sk) w stosunku osadu źródłowego.

(2) Przypadek I, transformacja osadu z A do C w wyniku transportu i depozycji w warunkach powolnego spadku energii przepływu. Materiał transportowany, który w takich warunkach ulega całkowitej depozycji (C) jest drobniejszy lepiej wysortowany i o rozkładzie bardziej prawoskośnym (ujemne wartości wskaźnika Sk) od osadu źródłowego (A).

(3) Przypadek III, transformacja osadu z A do D w wyniku transportu i depozycji w warunkach gwałtownego spadku energii przepływu. W tych warunkach selektywnie zdeponowany materiał (D) jest bardziej gruboziarnisty, także lepiej wysortowany i o rozkładzie lewoskośnym w stosunku do materiału źródłowego (A). Osad ten ma cechy uziarnienia zbliżone do bruku (przypadek II).

Druga z omawianych metoda analizy trendu sedymentacji, to analiza przestrzennego rozkładu osadów przy użyciu wskaźników uziarnienia. Zastosowała ona zaproponowana przez Asselman (1999) w analizie rozmieszczenia aluwii pozakorytowych na równinie zalewowej rzeki Waal przy użyciu parametrów Folka i Warda (1957). Metoda

ta jest modyfikacją metody Gao i Collinsa (1992) i polega na wykonaniu mapy rozkładu wskaźników uziarnienia przy pomocy interpolacji danych punktowych metodą krygingu. Na podstawie wyników analizy przeprowadzonej przez Asselman (1999) można stwierdzić następujące prawidłowości:

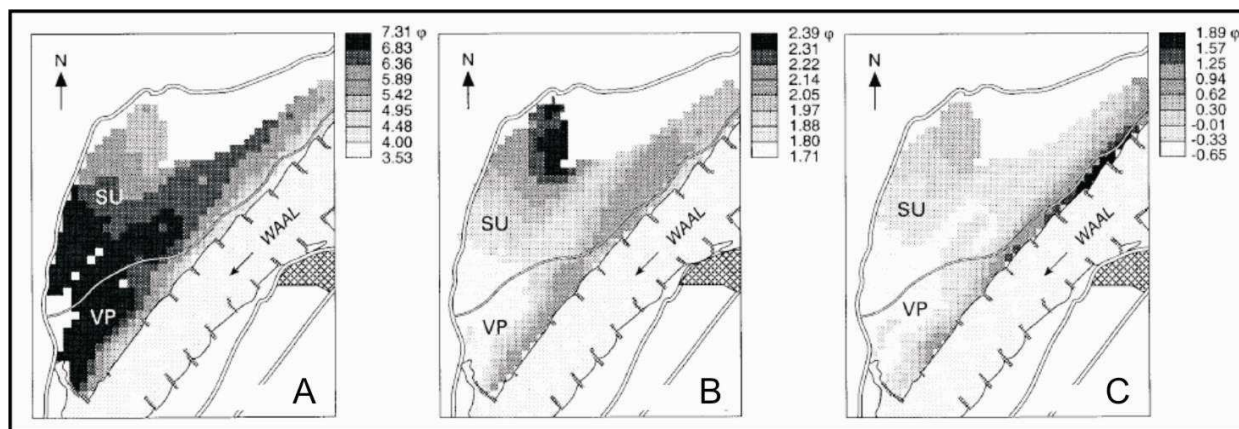
(1) W depozycji aluwii pozakorytowych: wraz z drobnieniem frakcji (wyrażonej w średniej średnicy ziarna), następuje polepszenia się wysortowania i tendencja wzrostu częstości ziaren drobniejszych od mediany (rozkłady coraz bardziej ujemnie skośne) w deponowanych aluwiiach.

(2) Zmiany uziarnienia deponowanych aluwii następują wraz ze wzrostem odległości od koryta rzeki i wzrostem szerokości równiny zalewowej (ryc. 6).

Do analizy trendów sedymentacyjnych w środowisku fluwialnym zaliczyć można także metodę zaproponowaną przez Mycielską-Dowgiałło (2007). Zakłada ona sposób interpretacji rozkładu populacji badanych próbek na diagramie zależności średniej średnicy ziarna (M_z) do wysortowania (σ_1), ujęty w 3. głównych układach:

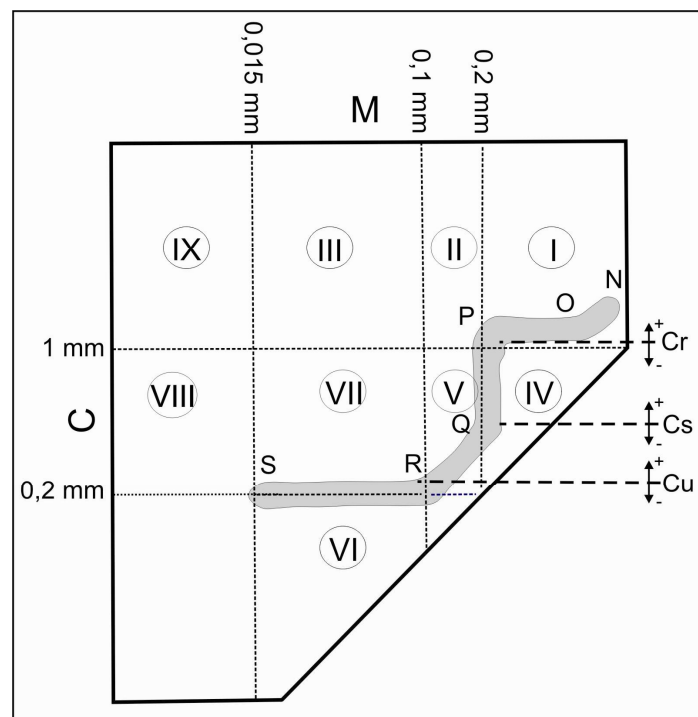
(1) Układ I – Polega na pogarszaniu się wysortowania wraz ze wzrostem średniej średnicy ziarna Osady, które opisuje ten trend powstają w warunkach przewagi sortowania przerywanej okresami wzmoczonego przepływu z depozycją gruboziarnistego materiału klastycznego. Układ ten rejestruje wzrost kompetencji środowiska.

(2) Układ II - Przeciwny trend pogarszania się wysortowania wraz ze zmniejszaniem się średniej średnicy ziarna. Tworzy się w warunkach spadku kompetencji środowiska depozycyjnego np. we frakcjach pylastych typowy dla aluwii powodziowych. Występuje także w osady bruku korytowego we frakcjach zwirowych.



Ryc. 6. Mapy rastrowe wskaźników uziarnienia, interpolowane metodą krygingu za Asselman (1999): A – rozkład średniej średnicy ziarna, B – rozkład wysortowania, C – rozkład skośności

Fig. 6. Raster maps of grain-size parameters, interpolated using block kriging after Asselman (1999): A - Estimated mean grain size; B - estimated sorting; C - estimated skewness



Ryc. 7. Diagram C/M wg Passegi (1964) i Passegi, Byramjee (1969)
Fig. 7. CM diagram after Passega (1964) and Passega, Byramjee (1969)

(3) Układ III - Trend stałego wysortowania niezależnie od zmiany średniej średnicy ziarna typowy dla osadów powstających w środowiskach o małej dynamice.

Metoda ta została zastosowana w analizie procesów fluwialnych w dolinie Belnianki (Ludwikowska-Kędzia, 2000) i dolinie Wieprzy (Florek i Kaczmarzyk 2007; Kaczmarzyk i in., 2008). Jednak w mojej opinii, mimo, że poprawnie opisuje zapis procesów sedymentacyjnych, to wymaga jeszcze rozszerzenia i ewentualnej reinterpretacji, ponieważ w przypadku aluwów rzecznych występują także inne trendy na diagramie zależności średniej średnicy ziarna do wysortowania i szersze możliwości ich interpretacji (Folk, Ward, 1957; Sly i in., 1983; Ludwikowska-Kędzia, 2000; Szymańda, 2004).

Interpretacja sposobu transportu ziaren

Metoda oceny warunków depozycyjnych w zakresie sposobu transportu ziaren na diagramie zależności C/M (pierwszego percentyla do mediany), została opracowana przez Passagę (1957, 1964) oraz Passagę i Byramjee (1969) – ryc. 7.

Na diagramie zamieszczono następujące informacje:

(1) Punkty infleksji S-kształtnego pola transportu rzecznoego (oznaczonego szarym kolorem na diagramie), wyznaczane indywidualnie dla badanej populacji próbek (Passega, 1957; 1964):

punkt P - *Cr* - minimalna średnica ziarna przemieszczanego w osadzie w skutek trakcji i jednocześnie maksymalna średnica ziarna, które mogły być transportowane w formie zawiesiny przydennej (saltacji);

punkt Q - *Cs* - maksymalny wymiar ziaren transportowanych w zawieszynie gradacyjnej (ang. *graded suspension*);

punkt R - *Cu* - maksymalny wymiar ziaren transportowanych w zawieszynie jednorodnej (ang. *uniform suspension*).

Punkty infleksji, jak zaznaczono strzałkami na diagramie, mogą przybierać różne wartości w zależności od badanej populacji próbek.

(2) Segmenty pola transportu rzecznoego (Passega, 1957; 1964):

(a) Osady deponowane w przewodzie z ładunku dennego (ang. *bed load*):

N-O – toczenie (ang. *rolling*),

O-P – toczenie z udziałem zawiesiny (ang. *rolling with some grain transported in suspension*).

(b) Osady deponowane z ładunku zawiesinowego (ang. *suspended load*):

P-Q – zawieszyna gradacyjna z udziałem toczenia (ang. *graded suspension with some grain transported by rolling*),

Q-R – zawiesina gradacyjna (ang. *graded suspension*),

R-S – zawiesina jednorodna (ang. *uniform suspension*).

(3) Pola poszczególnych typów środowisk depozycyjnych (Passega, Byramjee; 1969):

I, II, III, IX – dominująca depozycja z trakcji z niewielkim udziałem zawiesiny;

IV, V, VI, VII – dominująca depozycja z zawiesiny przy niewielkim udziale ziaren drobniejszych od 1 mm akumulowanych z trakcji.

IV – zawiesina gradacyjna transportowana w warunkach dużej turbulencji;

V – zawiesina gradacyjna transportowana w warunkach umiarkowanej turbulencji ;

VI – zawiesina gradacyjna transportowana w warunkach niskiej turbulencji;

VII – zawiesina o określana jako jednorodna, cechująca się jednak zróżnicowanym uziarnieniem,

VIII – drobnoziarnista zawiesina jednorodna typu pelagicznego (dekantacyjna).

Propozycja Passegi (1964) i Passegi Byramjee (1969) dotycząca interpretacji rozmieszczenia próbek osadów pod kątem sposobu transportu ziaren znalazła liczne zastosowania w badaniach aluwii rzecznych (m.in.: Royse, 1968; William, Rust, 1969; Allen i in., 1972; Nelson, 1977; Brown, 1985; Peiry, 1988; Magilligan, 1992; Ramesh, Subramanian, 1992; Astrade, Bravard, 1999; Nyakairu i in., 2002; Arnaud-Fassetta, 2003; Ramamohanarao i in., 2003; Ollive i in., 2006; Opreanu i in., 2007). Należy dodać, że metoda Passegi był wykorzystywana także w badaniach warunków transportowych ziaren w środowiskach morskim, jeziornym (prądy turbidytowe), plażowym i eolicznym (Passega, 1957; 1977; Wang, Ke, 1997; Beck, 2009) czy w badaniach pedogenetycznych (Fortier, Allard, 2004).

W Polsce metoda ta została wyczerpująco omówiona w pracach Racinowskiego i in. (2001) i Mycielskiej-Dowgiałło (2007). Była także wykorzystywana w interpretacji środowiska fluwialnego m.in. przez: Kanieckiego (1976), Teisseyre'a (1989), Andrzejewskiego (1994), Czyżowską (1997), Ludwikowską-Kędzię (2000), Andrzejewskiego i Juśkiewicza (2003) oraz Kordowskiego (2003); w badaniach środowiska eolicznego przez Urbaniak-Biernacką (1976); a nawet w analizie procesów stokowych przez Smolską (2005; 2007).

Na podstawie badań własnych oraz cytowanych autorów, a także wniosków z analiz Bravarda i Peiry'ego (1999) należy stwierdzić, że pozycja punktów infleksji Cr, Cs i Cu na diagramie C/M

(ryc. 7), zależy od zmian energii przepływu rzeczno i związanych z nią prądów turbulentnych. Czynniki te powodują przesunięcie granicznych rozmiarów ziaren przemieszczanych w różny sposób, w kierunku wyższych lub niższych wartości C (pierwszego pecentyla). Tak więc na przykład, wraz ze wzrostem energii przepływów rzecznych rośnie rozmiar ziaren transportowanych w zawieszynie ziarnowej w stosunku do saltacji, a także przemieszczanych w saltacji w stosunku do trakcji. Ponadto, długość segmentu R-S (zawiesina jednorodna), a co za tym idzie zakres wielkości ziaren transportowanych w zawieszynie jednorodnej zmniejsza się wraz ze spadkiem energii przepływu na korzyść zawiesiny gradacyjnej.

S-kształtny segment rzeczny na diagramie C/M może także służyć do charakterystyki i porównania pomiędzy sobą warunków depozycyjnych aluwii akumulowanych w dnach różnych systemów rzecznych. Przykładowo, Arnaud-Fassetta (1998) opisał związek zmian sposobu transportu ziaren interpretowanych na diagramie C/M ze zmniejszaniem się energii przepływów rzecznych, któremu towarzyszy zmiana układu koryt systemu fluwialnego Rodanu. Osady deponowane w dnach dolin poszczególnych odcinków Rodanu według układu koryt lokują się w następujących segmentach diagramu C/M Passegi:

- (1) N-O-P-Q - układ koryt sandrowych przed czołem lodowca,
- (2) P-Q-R – układ potoku górskiego,
- (3) P-Q-P-S – układ rzeki roztopowej,
- (4) Q-R-S – układ rzeki meandrującej,
- (5) R-S – równina deltowa.

Mimo, że stosowałem tę metodę wielokrotnie w badaniach warunków depozycyjnych różnych środowisk fluwialnych (m.in. Wysota i in., 1996; Szymańda, 1998; 2000; Podgórski, Szymańda, 2002; 2004; Gierszewski i in., 2005; 2006a, 2006b, Szymańda i in., 2005) to, po ostatnich doświadczeniach badawczych, polegających na porównaniu wyników interpretacji litodynamicznej aluwii pozakorytowych Wisły metodą analizy krzywych kumulacyjnych (Visher, 1969) i na diagramie C/M stwierdzam, że modele Passegi (1964) oraz Passegi i Byramjee (1969) budzą wątpliwości interpretacyjne (Szymańda, 2007). Wyniki tych interpretacji stoją często w sprzeczności z interpretacją przebiegu krzywych kumulacyjnych uziarnienia. Przyczyną tych rozbieżności jest przede wszystkim mało precyzyjne określanie relacji pomiędzy udziałem poszczególnych rodzajów transportu na diagramie C/M w stosunku do dokładnie określonych kryteriów oznaczania punktów infleksji (ang. *truncations points*) CT i FT na krzywych kumulacyjnych

wg wzorców proponowanych przez Mossa (1962, 1963) i Vishera (1969). Na podstawie tych punktów ocenia się udział i wielkości ziaren podlegających tuż przed akumulacją trakcji i saltacji oraz depozycyjnych z zawiesiny.

Wątpliwości te potwierdzają rezultaty badań aluwioów Gangesu prowadzone przez Singh'a i in. (2007), z których wynika, że w warunkach zawiesiny ziarnowej, w sektorze Q-R (zawiesina gradacyjna) diagramu C/M Passegi mieszczą się osady deponowane z ładunku dennego. Ponadto Vandenberghe (1975) oceniając warunki depozycyjne środkowo-oligocenicznych, rytmicznie warstwowych morskich osadów mułkowo-ilastych, występujących na terenie Belgii, Danii, Holandii, Niemiec i Polski, stwierdza rozbieżności z interpretacją sposobu transportu ziaren według modelu Passegi. Osady te, których mediana mieści się w zakresie 2-25 μm , wpasowują się w segmenty Q-R i R-S (zawiesina gradacyjna i jednorodna). Jednak Vandenberghe sugeruje udział w ich depozycji także innego sposobu transportu ziaren. Jak wynika z analizy krzywych kumulacyjnych metodą Vishera (1969) w osadach tych stwierdzono bowiem obecność gruboziarnitych mułków, których wysortowanie wskazuje na depozycję z saltacji. Ponadto Eynon i Walker (1974), krytycznie oceniają przydatność diagramu Passegi do analiz paleośrodowiskowych. Twierdzą oni, że S-kształtny segment rzeczny jest przydatny tylko do analizy specyficznych warunków transportu trakcyjno-prądowego.

Ze wskazanych wyżej powodów zalecam rozważne wykorzystywanie diagramu C/M w analizach litodynamicznych.

Ocena warunków morfodynamicznych i stanu prądu

Warunki morfodynamiczne czyli erozyjne, transportowe i akumulacyjne można interpretować wykorzystując jedną z dwóch metod:

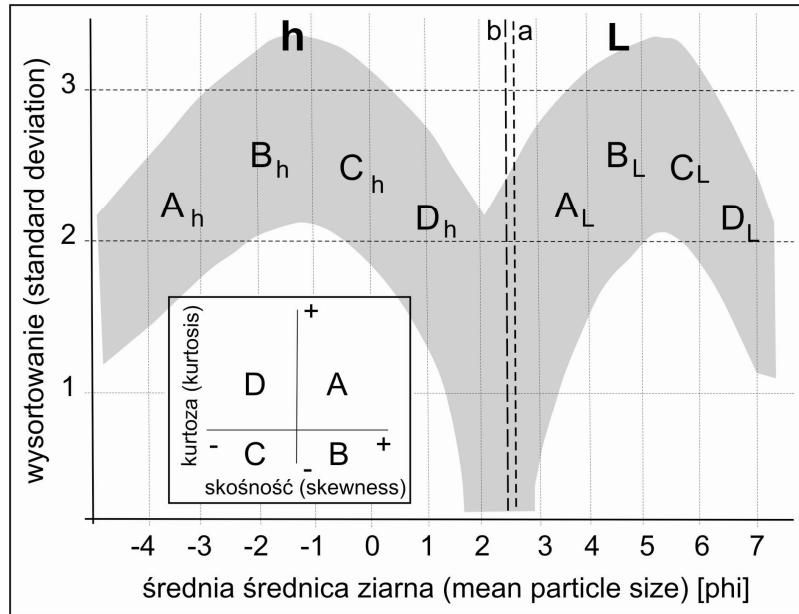
- metodę analizy rozmieszczenia punktów na diagramie zależności skośności do kurtozy,
- metodę kompleksowej analizy anomalii wskaźników uziarnienia.

Pierwsza z nich opracowana została przez Thomasa i in. (1972) oraz Sly i in. (1983). Na podstawie badań uziarnienia osadów rzecznych, jeziornych i plażowych w oparciu o wskaźniki wyliczone metodą momentów stwierdzono, że dla badanych populacji próbek na wartości około 2,7 phi (linia a, ryc. 8) występują największe wartości

skośności, zarówno ujemnych jak i dodatnich. Uznano tą wartość jako graniczną, determinowaną zmianą stanu prądu z wysoko- na niskoenergetyczny. Ponadto w zakresie wartości 2,5 phi (linia b, ryc. 8) stwierdzono największe wartości kurtozy, powodowane tym samym czynnikiem. Podane wartości średnicy ziaren dla wartości granicznej skośności i maksymalnej kurtozy są zbliżone z wartościami najlepszego wysortowania w zakresie frakcji drobnopiaszczystych, które najłatwiej podlegają erozji (Sundborg, 1967). Rozkład próbek na diagramie zależności średniej średnicy ziarna do wysortowania (ryc. 8), który zaznaczony został ciemnym kolorem, pokrywa się z M-kształtnym rozkładem próbek na diagramie zależności M_z do σ_1 zamieszczonym w pracy Folka i Warda (1957). Interpretując ten rozkład próbek na diagramie średniej średnicy ziarna i wysortowania Sly i in. (1983) zaznaczyli literami A, B, C, D grupy osadów tworzące się w różnych warunkach morfodynamicznych w dwóch stanach prądu: prądzie rwącym (h) i spokojnym (L). Na diagramie skośności do kurtozy próbki te rozmieszczone są w polach rozdzielonych wartościami 0, odpowiadającym symetrycznemu i mezokurtycznemu rozkładowi uziarnienia. Rozkłady te teoretycznie nie są determinowanymi żadnym czynnikiem ani prądowymi ani materiałem źródłowym. W polu A lokują się osady powstające w warunkach akumulacyjnych, w polu B i C w warunkach transportowych, a w polu D w warunkach rozmywania.

Sly i in. (1983) na diagramie skośności i kurtozy wyznaczyli także dwa trendy rozkładu próbek osadów (ryc. 9). Trendy te zostały powiązane ze stanami energetycznymi prądu wodnego. Pierwszy z warunkami dolnego (prąd spokojny), a drugi z warunkami górnego reżimu przepływu (prąd rwący).

Analizując rozkład próbek aluwioów pozakorytowych Dunaju (Szmańda, 2009) oraz próbek osadów dennych Zbiornika Włocławskiego (Gierszewski, Szmańda, 2007a,b) na tym diagramie stwierdziłem, że ich trend odpowiada warunkom dolnego reżimu przepływu. W tym miejscu chciałbym dodać, że we wspomnianych badaniach posługiwałem się wskaźnikami Folka i Warda (1957), i mimo, że w parametry te słabo korelują z miarami momentowymi (Racinowski i in., 2001), zaproponowany przez Sly i in. (1983) model do analizy stanu prądu okazał się poprawny, także w przypadku badanych przeze mnie osadów.

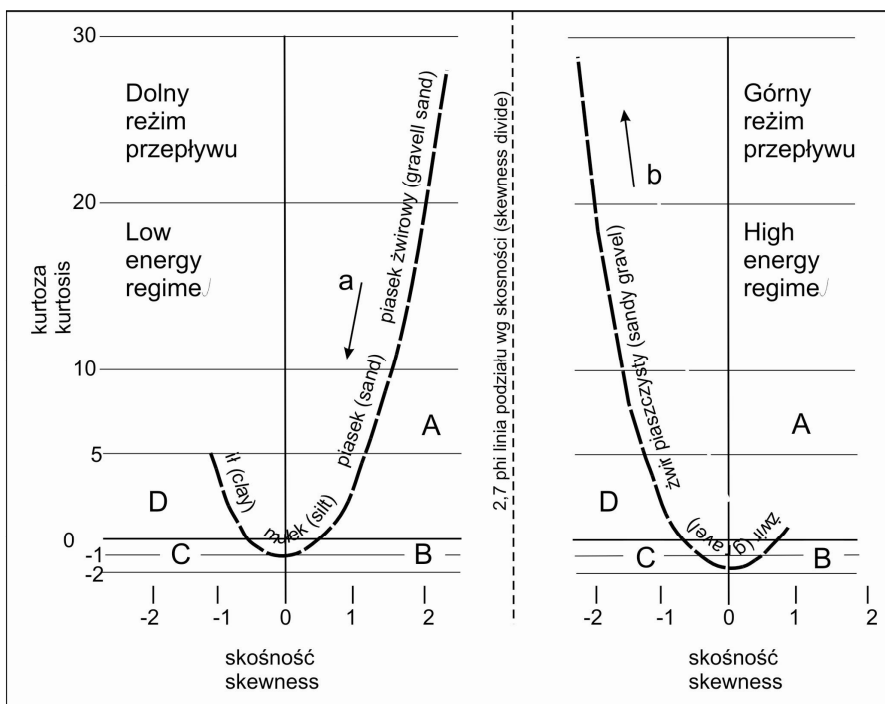


Ryc. 8. Zależność pomiędzy średnią średnicą ziarna i wysortowaniem oraz skośnością i kurtozą, na tle stanu prądu i warunków morfometrycznych wg Sly i in. (1983)

A – warunki akumulacyjne, B i C – warunki transportowe, D – warunki erozyjne, a – maksymalne wartości kurtozy, b – granica skośności, h – górny reżim przepływu, A_h – warunki akumulacyjne górnego reżim przepływu, B_h i C_h – warunki akumulacyjne górnego reżim przepływu, D_h – warunki erozyjne górnego reżim przepływu, L – dolny reżim przepływu, A_L – warunki akumulacyjne górnego reżim przepływu, B_L i C_L – warunki akumulacyjne górnego reżim przepływu, D_L – warunki erozyjne górnego reżim przepływu,

Fig. 8. Relations between mean grain size and sorting as well as skewness and kurtosis, on the base of energy flow regime and morphometrical conditions after Sly et al. (1983)

A – erosional condition, B and C – transport, D – deposition, a – maximum kurtosis value, b – skewness divided, h - high energy regime, A_h – erosional condition of high energy regime, B_h i C_h – transport in high energy regime condition, D_h – deposition in high energy regime condition, L - low energy regime, A_L – erosional condition of low energy regime, B_L i C_L – transport in low energy regime condition, D_L – deposition in low energy regime condition



Ryc. 9. Rozkład osadów na diagramie skośności do kurtozy w relacji do energii reżimu przepływu.

A – warunki akumulacyjne, B i C – warunki transportowe, D – warunki erozyjne, a – sortowanie przez selektywną depozycję drobnoklastycznych osadów z zawiesiny, b - selektywny transport poprzez resuspensję ziaren

Fig. 9. Distribution of deposits on skewness to kurtosis diagram in relation to flow energy regime. A – erosional condition, B and C – transport, D – deposition, a – sorting by selective deposition of progressively finer particles from suspension, b – selective transport by reduced ability to resuspend particles

Druga metoda analiz warunków morfodynamicznych została opracowana przez Baranieckiego i Racinowskiego (1989, 1996) oraz szczegółowo omówiona w skrypcie Racinowskiego i in. (2001). Jej procedura badawcza polega na analizie statystycznej metodą momentów, dużej populacji wartości czterech parametrów statystycznych wyznaczonych metodą Folka i Warda (1957). Analiza ta obejmuje wydzielenie dla każdego wskaźnika trzech subpopulacji:

(1) Subpopulacji „równowagi” zawierającej się w przedziale ufności lub odchylenia standardowego względem średniej, których wartości oznaczone są jako „zero”-„0”);

(2) Subpopulacji anomalii dodatnich - „plus”-„+”, wartości wskaźnika powyżej górnej granicy subpopulacji „0”;

(3) Subpopulacji anomalii ujemnych - „minus”-„-”, poniżej dolnej granicy subpopulacji „0”.

W dalszej kolejności porządkuje się wyniki analizy statystycznej przypisując wartościom anomalii cechy warunków rozmywania (R) lub depozycji (D), według schematu zamieszczonego w tabeli 2.

Tabela 2. Anomalie wskaźników uziarnienia
Table 2. Anomaly of Grain size parameters

Wskaźnik uziarnienia (Particle size parameter)	Anomalia (Anomalny)	
	(+)	(-)
Średnia średnica (Mean size)	D	R
Wysortowanie (storting)	R	D
Skośność (skweness)	D	R
Kurioza (kurtosis)	R	D

Łączne zestawienie wyników analizy anomalii wskaźników umożliwia ocenę jakości i rangi procesów morfodynamicznych w warunkach fluwialnych. Metoda ta pozwala na wyznaczenie stref rozmywania (erozji), równowagi (transportu) oraz depozycji. Siła tych procesów zależy od liczby oznaczeń jednomianowych anomalii badanych wskaźników, przy czym decydujące znaczenie mają anomalie przeciętnej średnicy ziarna i wysortowania.

Obie opisane metody zostały wykorzystane w badaniach procesów morfodynamicznych zachodzących na dnie Zbiornika Włocławskiego (Gierszewski i Szymańda 2007a,b). Badania te dały zbieżne wyniki i pozwoliły wyciągnąć wniosek, że w formowaniu osadów dennych dominują warunki do krótkiego transportu ziaren klastycznych, a nie jak sądzono wcześniej warunki akumulacyjne. Wniosek ten potwierdza przepływową cechę tego zbiornika.

Podsumowanie

Omówione metody interpretacji litodynamicznej środowiska fluwialnego są pomocne w analizie aluwiiów szczególnie w przypadku, gdy nie ma możliwości opisu ich struktury. Badania eksperymentalne mające na celu określenie związków pomiędzy osadem, a warunkami energetycznymi przepływu rzecznoego i procesami erozji, transportu i depozycji pozwoliły na wypracowanie modeli, które umożliwiają interpretację paleośrodowiskową, ale także badanie procesów współczesnych (eksperymentów terenowych), które między innymi ze względów technicznych są kosztowne lub trudne do przeprowadzenia (przepływy powodziowe).

W analizach litodynamicznych niezwykle ważne są poprzedzające je badania uziarnienia osadów. Jak wykazują bowiem badania porównawcze, wyniki analiz uziarnienia różnią się w zależności od zastosowanej metody (m.in. Flemming, 2007; Hartmann, 2007; Syvitski, 2007, Płoskonka, w tym tomie). Istotne znaczenie w interpretacjach warunków sedymentacji na podstawie badań uziarnienia ma także sposób wyznaczania wskaźników uziarnienia. Ich wartości w zależności od zastosowanej metody są w różnym stopniu porównywalne (Racinowski i in., 2003). Problemy metodologiczne w zakresie interpretacji litodynamicznej, są ostatnio przedmiotem dyskusji naukowej (Hartmann, Flemming, 2007). Podsumowując tą dyskusję należy zwrócić uwagę, że błędy interpretacyjne wynikają nie tylko z wymienionych czynników (nieporównywalności wyników analiz uziarnienia oraz metod wyznaczania wskaźników), ale polegają także na przypisywaniu badanym wartościom parametrów uziarnienia tylko określonych warunków transportu i sedymentacji. Natomiast osady o tych samych cechach teksturalnych i strukturalnych mogą powstawać w różnych warunkach prędkości prądu (np. diagram na ryc. 3). Także sposób transportu ziaren zmienia się wraz ze zmianą energii przepływu (np. diagram Sundborga na ryc. 2). Na rozkład uziarnienia aluwiiów duży wpływ na także rozkład cząstek terygeniczných w przyrodzie (Pet-tijohn, 1957; Spencer, 1963; Szymańda, 2004; Flemming, 2007). Dlatego brak uwzględnienia materiału źródłowego na cechy uziarnienia osadów może także przyczyniać się do błędów interpretacyjnych w badaniach wpływu warunków środowiska sedymentacyjnego na rozkład wielkości ziaren.

W tym opracowaniu zebrałem szereg metod interpretacji litodynamicznej środowiska fluwialnego opartych o wskaźniki uziarnienia aluwiiów. Wszy-

stkie opisane metody mogą być stosowane z powodzeniem zarówno w badaniach paleośrodowiskowych jak i badaniach współczesnych procesów w ramach geomorfologii oraz geologii dynamicznej. Wyniki tych interpretacji należy traktować komplementarnie. Powstałe rozbieżności należy bezwzględnie sygnalizować i próbować dociekać ich przyczyn. Przykładem mogą być rozbieżności w interpretacji warunków ruchu ziaren metodą analizy krzywych kumulacyjnych i interpretacji rozmieszczenia próbek na diagramie C/M. Natomiast zgodność wyników interpretacji pozwala na ugruntowanie poprawności wniosków o rzeczywistych warunkach sedymentacyjnych w środowisku fluwialnym.

Literatura

- Аиполов Б.А., 1963. Чтение о реках. Москва.
- Allen G.P., Castaing P., Klingebiel A., 1972. Distinction of elementary sand population in the Gironde estuary (France) by r-mode factor analysis of grain size data. *Sedimentology*, 19, 1-2: 21-35.
- Andrzejewski L., 1994. Ewolucja systemu fluwialnego doliny dolnej Wisły w późnym glacie i holocenie na podstawie wybranych dolin jej dopływów. *Rozprawy UMK Toruń*.
- Andrzejewski L. Juśkiewicz W., 2003. Lithofacies diversification of the alluvia in the area of Kępa Dzikowska, Kępa Bazarowa, Kępa Strońska and of the Vistula floodplain near Toruń. *Prace Geogr.*, 189: 159-178.
- Antczak B., 1986. Transformacja układu koryta i zanik bifurkacji Warty w pradolinie warszawsko-berlińskiej i południowej części przełomu poznańskiego podczas późnego vistulianu. *Ser. Geografia, UAM*, 35: Poznań.
- Arnaud-Fassetta G., 2003. River channel changes in the Rhone Delta (France) since the end of the Little Ice Age: geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management. *Catena*, 51: 141-172.
- Arnaud-Fassetta, G., 1998. Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône. Thesis in physical Geography, Université d'Aix-Marseille I. Presses Universitaires du Septentrion, Lille.
- Ashley G.M., 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *J. Sedim. Res.*, 60, 1: 160-172.
- Asselman, N.E.M., 1999. Grain-size trends used to assess the effective discharge for floodplain sedimentation, river Waal, the Netherlands. *J. Sedim. Res.*, 69, 1: 51-61.
- Astrade L., Bravard J.-L., 1999. Energy gradient and geomorphological processes along a river influenced by neotectonic (The Saône river, France). *Geodinamica Acta (Paris)*, 12, 1:1-10.
- Baba J., Komar P.D., 1981. Measurement and analysis of settling velocities of natural quartz sand grain. *J. Sedim. Petrol.*, 51: 631-640.
- Baker V.R., 1974. Paleohydraulic interpretation of Quaternary alluvium near Golden, Colorado. *Quater. Res.*, 4: 94-112.
- Baraniecki J., Racinowski R., 1989. Wykorzystanie parametrów uziarnienia rumowiska z dolnej części spływu strefy potoku przyboju do określania tendencji rozwojowych brzegu morskiego wyspy Wolin. [W:] *Brzeg Morski 1, Zeszyt prac zebranych, Stud. i Mat. Ocean.*, 55, Ossolineum: 107-129.
- Baraniecki, J., Racinowski, R., 1996, The application of graining parameters of the rubble from the lower part of the back-swash of the shore stream zone to the determination of evolution tendencies of the Wolin Island coast. [W:] Z. Meyer (red.), *Lithodynamics of Seashore*. Polish Academy of Sciences, Technical University of Szczecin: 27-38.
- Beck Ch., 2009. Late Quaternary lacustrine paleoseismic archives in north-western Alps: Examples of earthquake-origin assessment of sedimentary disturbances. *Earth Science Reviews*, 96: 327-344.
- Braithwaite C. J. R., 1973: Settling behaviour related to sieve analysis of skeletal sands, *Sedimentology*, 20, 2: 251-262.
- Bravard J.-P., Peiry J.-L., 1999, The CM pattern as a tool for the classification of alluvial suites and floodplains along the river continuum. [W:] Marriott S.B., Alexander J. (red.), *Ancient Floodplain Evolution and Techniques for Analysis*, Geological Society, London, Special Publications, 163: 259-268.
- Brown A.G., 1985. Traditional and Multivariate techniques in the interpretation of floodplain sediment grain size variations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 281-291.
- Costa J.E., 1983. Paleohydraulic reconstructions of flash-flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front Range. *Geol. Soc. of Am. Bull.*, 94: 986-1004.
- Costa J.E., 1987. Rheologic, geomorphic and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flow, and debris flow. [W:] V.R. Baker, R.C. Kochel, P.C. Patton (red.), *Flood geomorphology*. J. Wiley & Sons, 113-122.

- Czyżowska E., 1997. Zapis zdarzeń Powodziowych na pograniczu Boreau i Atlantyku w osadach stożka napływowego w Podgrodziu. *Dok. Geogr.*, 5, IGiPZ PAN.
- Eschner T.R., Kichner J.E., 1984. Interpretations from measured sediment data, Platte River, Nebraska. *Sedimentology*, 31, 5: 569-573.
- Eynon G., Walker R.G., 1974. Facies relationships in Pleistocene outwash gravels, southern Ontario: a model for bar growth in barided rivers. *Sedimentology*, 21: 43-70.
- Ferguson R.I., Church M., 2004. A simple universal equation for grain settling velocity. *J. Sedim. Res.*, 74: 933-937.
- Flemming B.W., 2007. The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: Implications for sediment trend analysis. *Sedim. Geol.*, 202: 425-435.
- Florek W., Kaczmarzyk J., 2007. Współczesne formy i osady wezbraniowe Wieprzy na odcinku Staniewce – Kowalewice. [W:] R. Sołtysik (red.), *Systemy dolinne i ich funkcjonowanie*. Prace Instytutu Geografii AŚ w Kielcach, 16: 205-213.
- Folk R.L., Ward W.C., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *J. Sedim. Petrol.*, 27: 3–26.
- Folk R.L., 1966. A review of grain size parameters. *Sedimentology*, 6: 73-03.
- Fortier D., Allard M., 2004. Late Holocene syngenetic ice-wedge polygons development, Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago. *Can. J. Earth Sci.* 41: 997–1012.
- Froehlich W., 1982. Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzliny do koryta w górskiej zlewni fliszowej. *Prace Geogr. IGiPZ PAN*.
- Froehlich W., 1998. Transport rumowiska i erozja koryt potoków beskidzkich podczas powodzi w lipcu 1997. [W:] L. Starkel, J. Grela (red.), *Powódź dorzecza górnej Wisły w lipcu 1997 r.* Wyd. Oddz. PAN, Kraków: 133-144.
- Gao, S., Collins, M., 1992. Sand sediment transport patterns inferred from grain-size trends based upon definition of “transport vectors”. *Sediment. Geol.*, 80: 47–60.
- Gierszewski P., Szymańda J.B., 2007a. Grain size composition and sedimentological environments in the Włocławek reservoir bottom deposits (Vistula river, central Poland). *Proceedings of the Tenth International Symposium on River Sedimentation, Effects of River Sediments and Channel Processes on Social, Economic and Environmental Safety*, 5, 1-14 August 2007, Moscow, Russia: 100-108.
- Gierszewski P., Szymańda J.B., 2007b. Interpretacja środowisk sedymentacyjnych zbiornika włocławskiego na podstawie badań uziarnienia osadów dennych. [W:] E. Smolska E., D. Giriat (red.), *Rekonstrukcja dynamiki procesów geomorfologicznych – formy rzeźby i osady*. Wyd. Geogr. i Stud. Reg. UW, Komitet Badań Czwartorzędu PAN, Warszawa: 165-176.
- Gierszewski P., Szymańda J.B., Luc M., 2006. Distribution of the Bottom Deposits and Accumulation Dynamics in the Włocławek Reservoir (Central Poland). *J. WSEAS Transactions on Environment and Development*, 5, 2: 543-549.
- Gradziński R., Kostecka A., Radomski A., Unrug R., 1976. *Sedymentologii*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Gradziński R., Kostecka A., Radomski A., Unrug R., 1986. *Zarys sedymentologii*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Grzegorzczak M., 1970. *Metody przedstawiania uziarnienia osadów*. Prace Kom. Geogr.-Geol. 10, 2, Poznań.
- Hartmann D., 2007. From reality to model: Operationalism and the value chain of particle-size analysis of natural sediments. *Sedim. Geol.*, 202: 383-401.
- Hartmann D., Flemming B.W., 2007. From particle size to sediment dynamics: An introduction. *Sedim. Geol.*, 202: 333-336.
- Hjulström F., 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. *Bull. Geol. Inst., Uppsalla* 25.
- Kaczmarzyk J., Florek W., Olszak I.J., 2008. Górnoholoceny i współczesne formy osady pozakorytowe w dolinie środkowej Wieprzy. *Landform. Analysis*, 7: 80-94.
- Kaniecki A., 1976. Dynamika rzeki w świetle osadów trzech wybranych odcinków Prosnicy. *Prace Kom. Geogr.-Geol.*, 17, Poznań.
- Kordowski J., 2003. Struktury wewnętrzne i uziarnienie osadów pozakorytowych doliny dolnej Wisły w Kotlinie Toruńskiej i Basenie Unisławskim. *Przeł. Geogr.*, 75, 4: 601-621.
- Koster E.H., 1978. Transverse rib: their characteristics, origin and paleohydrologic significance. [W:] A.D. Miall (red.), *Fluvial sedimentology*. *Can. Soc. Petrol. Geol. Mem.*, 5: 161-186.
- Krumbein W.C., 1936. Application of logarithmic moments to size frequency distribution of sediments. *J. Sedim. Petrol.*, 6: 35-47.
- Le Roux J.P., 1977. Comparison of sphericity indices as related to the hydraulic equivalence of settling grains. *J. Sedim. Res.*, 67: 527-530.
- Le Roux, J.P., 1994. An alternative approach to the identification of sand sediment transport paths

- based on a grain-size trends. *Sediment. Geol.* 94: 97–107.
- Le Roux J.P., 2002. Shape entropy and settling velocity of natural grain. *J. Sedim. Res.*, 72: 363–366.
- Le Roux J.P., Rojas E.M., 2007. Sediment transport patterns determined from grain-size parameters: overview and state of the art. *Sedim. Geol.*, 202: 473–488.
- Ludwikowska-Kędzia M., 2000. Ewolucja środowiskowego odcinka doliny Belnianki w późnym glacjał i holocenie, Wyd. Akad. Dialog, Warszawa.
- Magilligan F.J., 1992. Sedimentology of a fine-grained aggrading floodplain. *Geomorphology*, 4: 459–408.
- Maizels J.K., 1989. Sedimentology. paleoflow dynamics and flow history of jokulhlaup deposits: paleohydrology of Holocene sediment sequences in S Iceland sandr deposits. *J. Sedim. Petrol.*, 59: 204–223.
- Mazumder B.S., 1994. Grain size distribution in suspension from bed materials. *Sedimentology*, 41: 271–277.
- McLaren P., 1981. An interpretation of trends in grain size measures. *J. Sedim. Petrol.*, 51: 611–624.
- McLaren P. Bowles D., 1985. The effects of sediment transport on grain-size distributions. *J. Sedim. Petrol.*, 55: 457–470.
- Miller M.C., McCave I.N., Komar P.D., 1977: Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentology*, 24: 507– 527.
- Młynarczyk Z., 1985. Rola wielkości i kształtu ziarna w transporcie fluwialnym. *Prace Kom. Geogr.-Geolo. PTPN*, 21.
- Mohd-Lokman H., Rosnan Y., Ejria S., Skazili N.A.M., Kassim K.K.Y., 1998. Deducing sediment transport direction and the relative importance of rivers on a tropical microtidal beach using the “Mc Laren model”. *Environ. Geol.*, 34, 2–3: 128–134.
- Molewski P., Szymańska J., Andrzejewski L., 2005. Sedimentologia osadów terasy kemowej w północno zachodniej części przedpola Tungnaárjökull i jej paleogeomorfologiczna interpretacja. [W:] P. Molewski (red.), *Terenowe Warsztaty Geomorfologiczne Islandia 14-28 sierpnia 2005. Rekonstrukcja procesów glacialnych w wybranych strefach marginalnych lodowców Islandii – Formy i osady*: 47–56.
- Morris W.J., 1957. Effects of sphericity, roundness and velocity on traction transportation of sand grain. *J. Sedim. Petrol.*, 27: 27–31.
- Moss A.J., 1962/1963. The physical nature of common sandy and pebble deposits. *Am. J. of Science*, 1, 260, 5: 337–373; 2, 261, 4: 297–343.
- Mycielska-Dowgiało E., 2007. Metody badań cech teksturalnych osadów klastycznych i wartość interpretacyjna wyników. [W:] E. Mycielska-Dowgiało, J. Rutkowski (red.), *Badania cech teksturalnych osadów czwartorzędowych i wybrane metody oznaczania ich wieku*, Wyd. Szkoły Wyższej Przymierza Rodzin, Warszawa.
- Nelson C.S., 1977. Grain size parameters of insoluble residues in mixed terrigenous-skeletal carbonate sediments and sedimentary rocks: some New Zealand examples. *Sedimentology*, 24: 31–52.
- Nyakairu G.W.A, Kurzweil H., Koeberl Ch., 2002. Mineralogical, geochemical, and sedimentological characteristics of clay deposits from central Uganda and their applications. *J. African Earth Science*, 35: 123–134.
- O’Connor, J.E., 1993. Hydrology, Hydraulics, and Geomorphology of the Bonneville Flood. Special Paper, 274, Geological Society of America, Boulder Co.: 1–83.
- Ollive V., Petit Ch., Garcia J.-P., Redde M., 2006. Rhine flood deposits recorded in the Gallo-Roman site of Oedenburg (Haut-Rhin, France). *Quaternary International*, 150: 28–40.
- Opreanu G., Oaie G., Păun F., 2007. The Dynamic Significance of the Grain Size of Sediments Transported and Deposited by the Danube, [W:] *Coastal Zone Processes and Management. Environmental Legislation. Geo-Eco-Marina*. 13: 111–119.
- Passega R., 1964. Grain-size representation by CM patterns as a geological tool. *Journal Sed. Petrol.*, 34: 830–847.
- Passega R., Byramjee R. 1969. Grain size image of clastic deposits. *Sedimentology*, 13: 830–847.
- Passega, R., 1977. Significance of CM diagrams of sediments deposited by suspension. *Sedimentology*, 24: 723–733.
- Peiry J.-L., 1988. Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments sur un cours d’eau intramontagnard ; l’exemple de la plaine alluviale de l’Arve (Haute-Savoie). *Thèse de Géographie et Aménagement. Université Jean Moulin, Lyon 3*.
- Pettijohn F. J., 1957. *Sedimentary rocks*. Haper, New York.
- Płoskonka D., 2010: Różnice w wynikach uziarnienia przeprowadzonych różnymi metodami. *Landform Analysis*, 12: 78–84.
- Podgórski Z., Szymańska J., 2002. Antropogeniczne przekształcenia wybranych fragmentów rynn

- Strugi Kowalewskiej wskutek budowy i funkcjonowania młynów wodnych. *AUNC, Ser. Geog.*, 32, 109: 111-125.
- Podgórski Z., Szmańda J., 2004. Osady denne małych zbiorników zaporowych Pojezierza Chełmińskiego na tle osadów wybranych środowisk sedymentacyjnych, *Prace Geo-graficzne*, 200: 265-278.
- Poole D.M., 1957. Size analysis of sand by a sedimentation technique. *J. Sedim. Petrol.*, 27: 460-468.
- Racinowski R., Szczepke T., Wach T., 2001. Prezentacja i interpretacja wyników badań uziarnienia. Wyd. UŚ, Katowice.
- Ramamohanarao T., Sairam K., Venkateswararao Y., Nagamalleswararao B., Viswanath K., 2003. Sedimentological characteristics and depositional environment of Upper Gondwana rocks in the Chintalapudi sub-basin of the Godavari valley, Andhra Pradesh, India. *J. Asian Earth Science*, 21: 691-703.
- Ramesh R., Subramanian V., 1992. Textural characteristic of the Krishna river sediments, India. *GeoJournal* 28, 4: 449-455.
- Royse Ch.F., 1968. Recognition of fluvial environments by particle-size characteristics. *J. Sedim. Petrol.*, 38:1171-1178.
- Ruby W., 1933. Settling velocities of gravel, sand and silt particles. *Am. Jour. of Scien.*, 25: 325-338.
- Singh M., Singh I.B., Müller G., 2007. Sediment characteristics and transportation dynamics of the Ganga River. *Geomorphology*, 86: 144-175.
- Singh M., Singh I.B., Müller G. 2007. Sediment characteristics and transportation dynamics of the Ganga River. *Geomorphology*, 86: 144-175.
- Sly P.G., Thomas R. L., Pelletier B. R., 1983. Interpretation of moment measures derived from water-lain sediments. *Sedimentology*, 30: 219-233.
- Smolska E., 2005. Znaczenie spłukiwania w modelowaniu stoków młodoglacjalnych (na przykładzie Pojezierza Suwalskiego. *Wydz. Geografii i Studiów Regionalnych UW, Warszawa*.
- Smolska E., 2007. Development of gullies and sediment fans in last glacial areas on the example of the Suwałki Lakeland (NE Poland). *Catena*, 71: 122-131.
- Solohub J.T., Klován J.E., 1970. Evaluation of grain-size parameters in lacustrine environments. *Journal Sed. Petrol.*, 40: 81-101.
- Southard, J. B., and Boguchwał, L. A., 1973. Flume experiments on the transition from ripples to lower flat bed with increasing sand size. *J. Sed. Petrol.*, 43: 1114-1121.
- Southard J. B., Boguchwał L. A., 1990. Bed configurations in steady unidirectional water flows. Part 2. Synthesis of flume data. *J. Sedim. Petrol.* 60, 5: 658-79
- Spencer D.W., 1963. The interpretation of grain – size distribution curves of clastic sediments, *J. Sedim. Petrol.*, 33: 180-190.
- Sundborg A., 1956. The River Klaralven: a study of fluvial processes. *Geogr. Ann.*, 38: 127-316.
- Sundborg A., 1967. Some aspects on fluvial sediments and fluvial morphology. *Geogr. Ann.*, 5, 49^a: 333-343.
- Syvitski J.P.M. (red.), 2007, *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Szmańda J., 1998. Aluwia wybranych obszarów równin zalewowych Drwęcy i Tażyny w świetle analiz teksturalnych. [W:] K. Pękala (red.), *Główne kierunki badań geomorfologicznych w Polsce stan aktualny i perspektywy, Referaty i komunikaty, IV Zjazd Geomorfologów Polskich*, Wyd. UMCS, Lublin: 185-190.
- Szmańda J., 2000. Litodynamiczny zapis powodzi w aluwiach pozakorytowych Wisły. [W:] P. Molewski, W. Wysota (red.), *Dawne i współczesne systemy morfogenetyczne środkowej części Polski Północnej. Przewodnik wycieczek terenowych. V Zjazd Geomorfologów Polskich 11-14 września 2000*, Toruń: 221-231.
- Szmańda J.B., 2004, *Znaczenie materiału źródłowego i transportu ziaren w akumulacji powodziowej – studium przypadku – aluwia pozakorytowe Wisły, Drwęcy i Tażyny*, *Prace Geogr. IGIPZ PAN*, 200: 355-372.
- Szmańda J.B., 2007. Porównanie interpretacji warunków transportu osadów na diagramie C/M i analizy krzywych kumulacyjnych aluwiów pozakorytowych Wisły w Toruniu. [W:] E. Smolska E., D. Giriat (red.), *Rekonstrukcja dynamiki procesów geomorfologicznych – formy rzeźby i osady*, *Wydz. Geogr. i Stud. Reg. UW, Komitet Badań Czwartorzędu PAN*, Warszawa: 367-376.
- Szmańda J.B., 2009. Próba interpretacji litodynamicznej warunków sedymentacji litofacji aluwiów pozakorytowych Dunaju w Bratysławie (Słowacja). *Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych*, 5, *Ser. Geogr.*, 88: 535-554.
- Szmańda J., Molewski P., Luc M., Andrzejewski L., 2005. Kształtowanie się rzeźby glacialnej i glaciofluwialnej na przykładzie fragmentu środkowej części strefy marginalnej Tungnaárjökull, [W:] P. Molewski (red.), *Terenowe Warsztaty*

- Geomorfologiczne Islandia 14-28 sierpnia 2005, Rekonstrukcja procesów glacialnych w wybranych strefach marginalnych lodowców Islandii – Formy i osady: 29-37.
- Teisseyre A.K., 1985. Mady dolin sudeckich. Cz. I: Ogólna charakterystyka środowiska (na przykładzie zlewni górnego Bobru). Geol. Sudet., 20, 1: 113-195.
- Teisseyre A.K., 1988. Mady dolin sudeckich. Cz. II: Wybrane zagadnienia metodologiczne, Geol. Sudet., 23, 1: 66-95.
- Teisseyre A.K., 1989. Mady dolin sudeckich. Cz. III: Subarealnie i subakwalnie deponowane osady pozakorytowe w świetle eksperymentu terenowego (1977-1979). Geol. Sudet., 23, 2: 1-55.
- Thomas R. L., Kemp L.W., Lewis C.F.M., 1972. Distribution, composition and characteristics of the surficial sediments of Lake Ontario. J. Sedim. Petrol., 42, 1: 66-84.
- Urbaniak-Biernacka U., 1976. Badania wydm środkowej Polski z wykorzystaniem metod statystycznych. Prace Nauk. Polit. Warszaw., Geodezja 17.
- Vandenberghe N., 1975. Sort communication, An evaluation of CM patterns for grain-size studies of fine grained sediments. Sedimentology, 22: 615-622.
- Visher G.S., 1969. Grain-size distributions and depositional processes. J. Sedim. Petrol., 39: 1074-1106.
- Wang X., Ke X., 1997. Grain-size characteristics of the extant tidal flat sediments along the Jiansu coast, China, Sedim. Geol., 112: 105-122.
- Wentworth C. K. 1929. Method of computing mechanical composition types in sediments. Bull. Geol. Soc. Am., 40: 771-790.
- Williams G.E., 1983. Palaeohydrological methods and some examples from Swedish fluvial environments: I. Cobble and boulder deposits. Geogr. Ann., 65A: 227-243.
- Williams P.F., Rust B.R., 1969. Sedimentology of a braided river. J. Sedim. Petrol., 39, 2: 649-679.
- Wysota W. Lankauf K.R., Molewski P. Szymańska J., 1996. Sedymentologia interstadialnej serii rzecznej (Rzęczkowo) zlodowacenia Wisły (Vistulian) odsłoniętej w południowo-zachodniej krawędzi Wysoczyzny Chełmińskiej. AUNC, Ser. Geogr., 28, Toruń: 39-63.
- Zieliński T., 1989. Litofacies and paleoenvironmental characteristic of the Suwałki outwash (Pleistocene, NE Poland). Ann. Soc. Geol. Polon., 59 ; 249-270.
- Zieliński T., 1992. Proglacial valley facies of the Silesian Upland genetic factors and their sedimentological effect. Geol. Sudet., 26: 83-118.
- Zieliński T., 1993. Sandry Polski północno-wschodniej – osady i warunki sedymentacji. Prace Nauk. UŚ, 1398, Katowice.
- Zwoliński Z., 1985. Sedymentologia osadów przyrostu pionowego na terasie zalewowej Parsęty, Bad. Fizjogr. nad Polską Zach., ser. A, Geogr. Fiz., 35: 205-238.

