

wyraził w 1962 roku Dennis Gabor, odkrywca holografii (laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki w 1971 roku). Przeprowadzone doświadczenia mają wartość poznawczą i służą do weryfikacji teorii fizycznych, jednak przewiduje się, że są one także punktem wyjścia do rozwiązania wielu problemów praktycznych. Metody pomiaru bez oddziaływania mogą znaleźć zastosowanie jako sposób fotografowania, dzięki któremu uzyskuje się obraz obiektu bez wystawienia go na działanie światła. Metody te da się zastosować również w przypadku obiektu półprzezroczystego. Zastosowanie takiego sposobu fotografowania może być pożyteczne np. w medycynie przy uzyskiwaniu obrazów żywych komórek. Innym

możliwym zastosowaniem jest możliwość fotografowania chmury ultrazimnych atomów przechodzących w stan materii zwany kondensatem Bosego-Einsteina (za odkrycie kondensatu Bosego-Einsteina O. Cornell, C.E. Wieman, W. Ketterle otrzymali w 2001 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki). W tym stanie atomy poruszają się tak powoli, że nawet pojedynczy foton może wybić je na zewnątrz niszcząc w ten sposób chmurę kondensatu. Pomiary bez oddziaływania mogą okazać się jednym sposobem sfotografowania takiego stanu atomów. Również wiąże się nadzieję z przeprowadzonymi doświadczeniami przy budowie komputerów kwantowych.

■ Dr Paweł Tomasz Pęczkowski jest pracownikiem Uniwersytetu Warszawskiego.

ZAPIS DYNAMIKI PRZEPŁYWU WODY I TRANSPORTU RUMOWISKA W CECHACH TEKSTURALNYCH ŻWIROWYCH OSADÓW KORYTOWYCH

Bartłomiej Wyżga (Kraków)

Wstęp

Cechy teksturalne osadów korytowych rzek żwirodennych mogą stanowić cenne źródło informacji o dynamice przepływu wody i transportu rumowiska. Właściwe rozpoznanie tej dynamiki jest podstawą paleogeograficznych rekonstrukcji systemów rzecznych i może umożliwiać odtwarzanie warunków środowiskowych w zlewniach. W przypadku rzek, których dno utworzone jest z materiału piaszczystego, zmiany dostawy rumowiska oraz natężenia jego transportu w rzece, wywołane zmianami środowiskowymi w zlewni, nie będą powodować istotnych zmian cech teksturalnych osadów korytowych. Z odmienną sytuacją mamy natomiast do czynienia w rzekach żwirodennych, gdzie zmiany udziału poszczególnych frakcji osadów korytowych, wynikające ze zmian dostawy i natężenia transportu rumowiska w rzece, będą znajdować wyraźne odzwierciedlenie w wysortowaniu i upakowaniu żwirów.

Cechy teksturalne żwirów w ciekach z różnych stref morfoklimatycznych

Można wymienić trzy źródła informacji wskazujących na możliwość wykorzystania cech teksturalnych żwirów rzecznych do oceny dynamiki przepływu wody i transportu rumowiska w dawnych systemach rzecznych oraz do interpretacji paleogeograficznych uwarunkowań zmian tej dynamiki. Pierwszym z nich są obserwacje wskazujące na różnice tych cech pomiędzy

osadami korytowymi wyścielającymi dno cieków w różnych strefach klimatycznych. Dobitnie ukazuje to porównanie osadów korytowych formowanych w stałych ciekach ze strefy umiarkowanej wilgotnej oraz w epizodycznych ciekach ze strefy półsuchej.

Większość stałych cieków żwirodennych charakteryzuje się obecnością powierzchniowej, gruboziarnistej warstwy bruku korytowego przykrywającej drobniejszy materiał denny (ryc. 1). Miąższość warstwy bruku korytowego odpowiada zazwyczaj 1–2 średnicom otoczków tworzących szkielet ziarnowy żwirów w podpowierzchniowej warstwie materiału dennego. Bruki takie powstają w wyniku wymywania drobniejszych ziaren z przypowierzchniowej warstwy osadu oraz mniejszej częstotliwości uruchamiania i wolniejszego transportu ziaren grubszych. Ponadto, formowane w tych ciekach żwiry cechuje zazwyczaj ciasne upakowanie i dachówkowate ułożenie (imbrykacja) otoczków tworzących szkielet ziarnowy. Widoczna na histogramach uziarnienia wyraźna przewaga frakcji żwirowej nad piaszczystą, a niekiedy wręcz unimodalny charakter osadu odzwierciedla stosunkowo dobre wysortowanie tych żwirów. Cieki okresowe i epizodyczne strefy półsuchej i suchej cechuje natomiast brak lub słaby rozwój bruków korytowych (ryc. 2). Formowane tu żwiry są zazwyczaj luźno upakowane, a otoczki tworzące szkielet ziarnowy tych osadów są rozproszone w piaszczystej masie wypełniającej. Żwiry takie wykazują bimodalny rozkład uziarnienia i bardzo złe

wysortowanie. Podobny charakter mają także osady korytowe rzek wypływających z lodowców. W rzekach tych powierzchnia osadów korytowych również nie jest pokryta brukiem korytowym i osady te cechuje luźne upakowanie i bardzo złe wysortowanie.



Ryc. 1. Gruboziarnista warstwa bruku korytowego tworząca powierzchnię łachy żwirowej w stałym cieku (przedni plan). Po usunięciu bruku korytowego widoczny drobniejszy materiał denny z podpowierzchniowej warstwy (środkowa część fotografii). Raba, polskie Karpaty. Fot. B. Wyżga.

Doświadczenia w sztucznych korytach eksperymentalnych

Powiązanie cech teksturalnych żwirów rzecznych z dynamiką procesów fluwialnych umożliwiły także doświadczenia przeprowadzane w sztucznych korytach eksperymentalnych. W opublikowanej w 1989 r. w *Nature* pracy Dietricha i współautorów opisano zmiany charakteru osadu na powierzchni dna eksperymentalnego koryta, zachodzące wraz ze zmianą natężenia dostawy różnoziarnistego, żwirowo-piaszczystego materiału. W czasie tego eksperymentu zarówno przepływ wody, jak i rozkład uziarnienia dostarczanego materiału pozostawał niezmieniony. Przy dużym natężeniu dostawy materiału uziarnienie osadu na powierzchni dna było takie samo, jak w dostarczonym materiale. W obrębie koryta zdecydowanie przeważały wówczas obszary o gładkim dnie, utworzone z drobnoziarnistego, źle wysortowanego osadu, ponad którymi opór przepływu był niewielki i stosunkowo duża część całkowitej energii przepływu mogła być wydatkowana na uruchamianie i transport ziaren. W rezultacie, zarówno ziarna piasku, jak i otoczaki były tu szybko transportowane. Wraz ze zmniejszaniem się dostawy materiału, w brzeżnych częściach koryta doszło do uformowania się nieaktywnych stref dna wysłanych gruboziarnistym, dobrze wysortowanym osadem, w których transport denny był niewielki lub nie występował w ogóle. Intensywny transport denny został natomiast ograniczony do wąskiej strefy dna pokrytej drobnoziarnistym, słabiej wysortowanym osadem.

Wyniki tego eksperymentu zaprzeczyły rozpowszechnionemu pogładowi, iż transport denny różnoziarnistego materiału żwirowego nieuchronnie prowadzi do formowania bruków korytowych. Pokazały

one, że do rozwoju obrukowania dna dochodzi wówczas, gdy lokalna dostawa obciążenia dennego z wyższego odcinka jest mniejsza od zdolności rzeki do transportu tego obciążenia. Stwarza to możliwość powiązania zmian stopnia rozwoju bruków korytowych ze zmianami dostawy rumowiska do rzeki, będącymi efektem zmian środowiskowych w jej zlewni.

Ilościowe badania transportu dennego w naturalnych ciekach

Trzecie źródło informacji umożliwiających powiązanie cech teksturalnych żwirów z dynamiką procesów fluwialnych stanowią ilościowe badania transportu dennego w naturalnych ciekach. Na uwagę zasługują zwłaszcza badania z wykorzystaniem oprzyrządowania umożliwiającego ciągły i długotrwały pomiar natężenia transportu dennego w danym przekroju, prowadzone w grupie kilku cieków obejmującej cieki stałe (Oak Creek w USA, Turkey Brook w Wielkiej Brytanii, Torrente Virginio we Włoszech oraz Torlesse Stream w Nowej Zelandii), okresowe (Goodwin Creek w USA) oraz epizodyczne (Nahal Yatir i Nahal Eshtemoa w Izraelu). W stacjach badawczych na tych ciekach wykorzystuje się dwa typy takiego oprzyrządowania. Jeden z nich oparty jest na działaniu śrubowych przenośników transportujących docierające do przekroju pomiarowego rumowisko wleczone poza obręb koryta, gdzie jest ono w ciągły sposób wazone. Drugi wykorzystuje natomiast szereg przegradzających dno cieku zbiorników, w których docierający do przekroju pomiarowego materiał denny jest akumulowany i również w ciągły sposób wazony. W połą-



Ryc. 2. Dno koryta okresowego cieku pokryte niewysortowanym materiałem żwirowym. Południowa Hiszpania, obszar o klimacie śródziemnomorskim. Fot. B. Wyżga.

czeniu z ciągłą rejestracją przepływu wody, prowadzone tu pomiary dostarczają zupełnie innych jakościowo danych o transporcie rumowiska wleczonego w ciekach żwirowych niż dane uzyskiwane za pomocą innych technik pomiarowych, np. łapaczy, umożliwiających jedynie punktowy i krótkotrwały pomiar transportu dennego.

Pomiary prowadzone w wymienionych ciekach wskazały na trzy istotne różnice w charakterze transportu dennego pomiędzy epizodycznymi ciekami ze

strefy półsuchej oraz stałymi ciekami ze strefy umiarkowanej wilgotnej. Po pierwsze, przy takiej samej sile transportowej natężenie transportu dennego zachodzącego na jednostkowej szerokości koryta osiąga w pozbawionym obrukowania dna cieków epizodycznym wartości o kilka rzędów wielkości wyższe niż w stałym cieku z dobrze rozwiniętym brukiem korytowym. Ponadto, w miarę wzrostu siły transportowej w stałym



Ryc. 3. Brak zwartej pokrywy roślinnej w obszarze o klimacie półsuchym warunkuje dużą dostawę rumowiska do koryta cieków epizodycznych, a konsekwencją małej miąższości pokryw zwietrzelinowych na stokach jest szybkie ustanie dopływu wody do cieków po ustaniu opadu. Południowa Hiszpania. Fot. B. Wyżga.

cieku obserwuje się znacznie większe zmiany natężenia transportu dennego niż w cieku epizodycznym.

Po drugie, pozbawione obrukowania dna cieków epizodycznych znacznie bardziej wydajnie wykorzystują swoją energię do transportu dennego niż obrukowane cieków stałe. Cieków wykorzystują bowiem do transportu rumowiska wleczonego jedynie małą część swej całkowitej energii, natomiast większość tej energii jest wydatkowana na pokonywanie oporów przepływu i na transport rumowiska unoszonego. Wydajność cieków w transporcie rumowiska wleczonego można określić, porównując wielkości jednostkowego natężenia transportu dennego z jednostkową mocą strumienia. Dane obserwacyjne pokazują, że w epizodycznym Nahal Yatir wydajność transportu dennego wynosi około 20% i zmienia się nieznacznie wraz ze wzrostem energii przepływu. Natomiast stały ciek Oak Creek cechuje średnia wydajność rzędu 0,05% i ulega ona istotnym zmianom wraz ze wzrostem energii przepływu, w miarę jak następuje rozrywanie bruku korytowego i odsłanianie drobniejszych ziaren z niższej warstwy materiału dennego.

Po trzecie, roczne ładunki rumowiska wleczonego przemieszczonego przez 1 m szerokości koryta są w ciekach epizodycznych od kilkunastu do kilkudziesięciu razy wyższe niż w badanych ciekach stałych. Obserwacja ta może wydawać się zaskakująca, gdy weźmie się pod uwagę krótki czas aktywności cieków epizodycznych. Przykładowo, koryto eksperymentalnego cieków Nahal Eshtemoa w Izraelu prowadzi wodę średnio przez 2% czasu, tj. przez 7 dni

w ciągu roku, natomiast stan pełnokorytowy jest tu przekroczony zaledwie przez 0,03% czasu, a więc średnio przez 3 godziny w roku. Należy jednak pamiętać, że w obrukowanych stałych ciekach zwirowych transport materiału dennego zachodzi tylko w czasie przepływów wezbraniowych. Duże natężenie transportu dennego ma w tych ciekach miejsce jedynie przez wycinek czasu trwania wezbrań, gdy siła transportowa cieków jest wystarczająca do rozerwania obrukowania dna, a drobniejszy materiał pod brukiem zostaje wystawiony na działanie przepływu zdolnego transportować grube otoczaki z powierzchniowej warstwy. Natomiast w ciekach epizodycznych, gdzie drobniejsze ziarna nie są osłonięte brukiem korytowym, transport denny rozpoczyna się przy niewielkich przepływach, na przykład w Nahal Eshtemoa już przy głębokości wody w korycie rzędu 15 cm, i od razu osiąga dość znaczne natężenie.

Pomiary prowadzone w naturalnych ciekach dowodzą zatem, iż niemające obrukowania dna cieków epizodycznych odprowadzają ze swych zlewni znacznie większe ładunki rumowiska wleczonego, w przeliczeniu na jednostkę szerokości koryta, niż stałe cieków o dnie wyścielonym brukiem korytowym. Cieków epizodycznych są bowiem znacznie bardziej wydajne w przenoszeniu materiału dennego i cechują się znacznie większym natężeniem transportu dennego przy tej samej jednostkowej mocy strumienia niż obrukowane cieków stałe.



Ryc. 4. Rozwój bruku korytowego na powierzchni dna cieków stałych jest efektem małej dostawy rumowiska ze stoków stabilizowanych przez pokrywę roślinną i wymywania drobniejszych ziaren z powierzchniowej warstwy materiału dennego w trakcie powolnego opadania fal wezbraniowych. Czarny Dunajec, polskie Karpaty. Fot. B. Wyżga.

Interpretacja środowiskowych uwarunkowań cech teksturalnych zwirowych osadów korytowych z różnych stref morfoklimatycznych

Na podstawie przedstawionych informacji można dokonać interpretacji środowiskowych uwarunkowań cech teksturalnych zwirowych osadów korytowych w ciekach z różnych stref morfoklimatycznych. Luźne upakowanie i bardzo złe wysortowanie osadów korytowych oraz brak obrukowania dna w ciekach epizodycznych strefy półsuchej i suchej to efekt

dużej dostawy rumowiska ze stoków pozbawionych zwartej pokrywy roślinnej (ryc. 3) i przenoszenia w korytach tych cieków wysokich i krótkotrwałych fal wezbraniowych. Brak intercepcji opadu na pokrywie roślinnej oraz niska zdolność infiltracji w wyniku pokrycia gleb skorupami mineralnymi warunkują tu wystąpienie spływu powierzchniowego



Ryc. 5. Żwir o luźnym upakowaniu zdeponowane w rozłotkowym korycie środkowej Raby w drugiej połowie XIX wieku. Fot. B. Wyżga.

wkrótce po rozpoczęciu opadu. Wraz z bardzo gęstą siecią odwodnienia na stokach powoduje to szybkie pojawienie się przepływu i gwałtowny przybór wody w cieku. Niewielka miąższość, a niekiedy brak pokryw zwietrzelinowych na stokach powoduje natomiast, że po ustaniu spływu powierzchniowego przepływ w ciekach nie jest dalej podtrzymywany przez odpływ śródpokrywowy lub podziemny (ryc. 3). Konsekwencją tego jest szybkie opadanie wody i zanik przepływu wkrótce po ustaniu opadu tak, że aktywność hydrologiczna cieków epizodycznych jest ograniczona do krótkich epizodów gwałtownego odprowadzania wód opadowych ze zlewni. W Nahal Eshtemoa w Izraelu w ciągu czterech lat hydrologicznych zanotowano jedynie 20 takich epizodów trwających od kilku do kilkudziesięciu godzin.

Duża dostawa rumowiska ze stoków nieosłoniętych roślinnością warunkuje duże natężenie jego transportu w korytach cieków epizodycznych. W konsekwencji, wymywanie drobniejszych ziaren, jakie mogłoby mieć miejsce przy niskim natężeniu transportu, nie zachodzi. Szybkie opadanie wody po przejściu szczytu fali wezbraniowej jest przyczyną gwałtownej depozycji transportowanego materiału i uniemożliwia jego sortowanie. Brak obrukowania dna umożliwia tu z kolei łatwe uruchamianie materiału dennego w czasie kolejnego wezbrania.

Z kolei, charakterystyczne dla większości stałych cieków obrukowanie dna oraz ciasne upakowanie i lepsze wysortowanie żwirów, to efekt zbyt małego zasilania tych cieków rumowiskiem w stosunku do ich zdolności transportowej i przemywania osadów korytowych w trakcie opadania fal wezbraniowych. Przy podobnej wielkości i hipsometrii zlewni, cieki stałe różnią się bowiem od cieków epizodycznych wyraźnie

dłuższym czasem trwania wezbrań oraz wolniejszym opadaniem wód wezbraniowych, gdy po ustaniu spływu powierzchniowego przepływ w ciekach jest nadal zasilany odpływem śródpokrywowym i podziemnym. W warunkach naturalnych głównym czynnikiem ograniczającym dostawę materiału klastycznego do koryt jest stabilizacja pokryw zwietrzelinowych na stokach przez roślinność, zwłaszcza przez lasy (ryc. 4). Przy silnej antropopresji w zlewniach znaczny rozwój bruków korytowych obserwuje się poniżej głębokich zbiorników zaporowych, przechwytyjących całość obciążenia dennego dostarczanego z wyższego odcinka rzeki. Rozwój obrukowania dna jest mechanizmem, za pomocą którego rzeki ograniczają mobilność materiału dennego, dążąc do przywrócenia równowagi pomiędzy zasilaniem rumowiskiem, a ich zdolnością transportową. Bruk korytowy ogranicza bowiem kontakt drobniejszych frakcji materiału dennego z płynącą wodą, redukując tym samym natężenie transportu dennego przy wszystkich przepływach niższych od przepływu mogącego transportować wszystkie wielkości ziaren obecnych w materiale dennym. Również ciasne upakowanie oraz imbrykacja otoczków ograniczają mobilność ziaren materiału dennego i rozwijają się przy małym natężeniu transportu i depozycji.



Ryc. 6. Żwir niewypelnione zdeponowane w krętym korycie środkowej Raby w latach 50. XX wieku. Fot. B. Wyżga.

W ciekach z obszarów o klimacie zimnym nie podjęto dotychczas takich ilościowych badań transportu dennego, jakie prowadzone są w ciekach strefy umiarkowanej wilgotnej oraz półsuchej. Cechy teksturalne formowanych tu żwirów są podobne, jak w ciekach epizodycznych strefy półsuchej, co wskazuje, że również i te cieki powinno cechować wysokie natężenie transportu dennego. Istotnie, są one obficie zasilane rumowiskiem, w przypadku rzek proglacialnych wytapianym z lodowców, a w przypadku rzek strefy periglacialnej będącym wynikiem intensywnego wietrzenia mrozowego i soliflukcyjnego przemieszczania zwietrzliny na stokach. Jednocześnie rzeki te cechuje duża zmienność przepływów, zarówno w cyklu rocznym, jak i dziennym, odzwierciedlająca przede wszystkim zmiany intensywności nasłonecznienia.

Interpretacja dynamiki dawnych rzek na podstawie analizy cech teksturalnych kopalnych żwirów – przykłady

Obserwacja omówionych cech teksturalnych w kopalnych żwirach pozwala na wnioskowanie o dynamice dawnych rzek, a zmiany tych cech pomiędzy osadami różnego wieku będą wskazywać na zmiany środowiskowe w zlewniach wywołane zmianami klimatu lub działalnością człowieka. Przykładu takich zmian cech teksturalnych żwirów dostarcza porównanie osadów depo-



Ryc. 7. Luźno upakowane, bardzo źle wysortowane żwiry Kamienicy Gorczańskiej odsłaniające się w profilu terasy z ostatniego zlodowacenia. Widoczne chaotyczne ułożenie większych otoczków w obrębie piaszczystej masy wypełniającej. Fot. B. Wyźga.

nowanych w roztokowym, agradującym korycie środkowej Raby z drugiej połowy XIX wieku oraz w naturalnym, krętym korycie tej rzeki uformowanym w połowie XX wieku. W korycie dziewiętnastowiecznej Raby deponowane były żwiry o normalnym i luźnym upakowaniu (ryc. 5), wśród osadów korytowych ówczesnej rzeki nie stwierdzono natomiast żwirów o ciasnym upakowaniu i poziomów bruków korytowych. Natomiast na łachach meandrowych krętej rzeki z połowy XX wieku były deponowane żwiry normalnie upakowane, a także wypełnione ciasno upakowane żwiry i żwiry niewypełnione (ryc. 6), które nie występowały w korycie z XIX wieku. Osady z połowy XX wieku były lepiej wysortowane od osadów dziewiętnastowiecznych, a w ich obrębie zaznaczała się obecność dachówkowato ułożonych otoczków i poziomów bruków korytowych.

Zaistniałe w XX wieku zmiany sedymentacji korytowej Raby i szeregu innych rzek karpackich wskazują na zmniejszenie się dostawy rumowiska z ich zlewni i na bardziej równomierny niż w XIX wieku przebieg odpływu wezbraniowego. Do ograniczenia dostawy rumowiska do koryt Raby i innych karpackich dopływów Wisły przyczyniły się następujące zmiany środowiskowe: stopniowe zaniechanie orki zgodnie z nachyleniem stoków i terasowanie stoków, zaniechanie wypasu w lasach (częstego w XIX wieku), przeciwnożytna zabudowa brzegów rzek i przegradzanie rzek głębokimi

zbiornikami zaporowymi przechwytyjącymi całość dostarczanego rumowiska dennego, a w przypadku rzek odwadniających wschodnią część polskich Karpat także wzrost lesistości zlewni, jaki nastąpił w Beskidzie Niskim i Bieszczadach po wysiedleniu ludności łemkowskiej po drugiej wojnie światowej.

Istotne różnice cech teksturalnych obserwuje się także pomiędzy żwirami rzek karpackich deponowanymi w czasie ostatniego zlodowacenia i współcześnie. Na przykład, żwiry Kamienicy Gorczańskiej, odsłaniające się w profilach terasy z ostatniego zlodowacenia, są luźno upakowane i cechują się bardzo złym wysortowaniem (ryc. 7). Taki charakter osadów wskazuje na obfite zasilanie ówczesnej rzeki rumowiskiem, spowodowane intensywnym wietrzeniem mrozowym i soliflukcyjnym przemieszczaniem zwietrzelin na stokach w warunkach klimatu peryglacjalnego. Współczesne dno rzeki jest natomiast wyścielone brukiem korytowym, a dwudziestowieczne osady korytowe Kamienicy odsłaniające się w podcięciach brzegów rzeki cechuje ciasne upakowanie i dachówkowate ułożenie klastów tworzących szkielet ziarnowy żwirów (ryc. 8). Oznacza to, że zasilanie współczesnej rzeki rumowiskiem jest wyraźnie mniejsze od jej zdolności transportowej. Stabilizacja pokryw zwietrzelinowych na stokach przez zwartą szatę roślinną ogranicza bowiem dostawę zwietrzelin ze stoków, a zabudowa regulacyjna części brzegów ograniczyła boczną migrację rzeki i rozmywanie jej starszych aluwów.



Ryc. 8. Ciasno upakowane żwiry Kamienicy Gorczańskiej odsłaniające się w profilu terasy z XX wieku. Widoczne dachówkowate ułożenie większych otoczków. Fot. B. Wyźga.

Na podstawie informacji przedstawionych w niniejszym artykule można sformułować wniosek, iż dynamika przepływu wody i transportu rumowiska w ciekach żwirowatych znajduje wyraźne odzwierciedlenie w cechach teksturalnych ich osadów korytowych. Analiza zmian wysortowania i upakowania żwirów oraz stopnia rozwoju bruków korytowych pomiędzy osadami różnego wieku będzie zatem dostarczać informacji o zmianach tej dynamiki w danej rzece i umożliwiać wnioskowanie o zmianach środowiskowych w jej zlewni.