POLSKA
AKADEMIA
NAUK

PL ISSN 0012-5032

INSTYTUT GEOGRAFII
I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA

DOKUMENTACJA GEOGRAFICZNA

ADAM ŁAJCZAK

ZRÓŻNICOWANIE TRANSPORTU ZAWIESINY W KARPACKIEJ CZĘŚCI DORZECZA WISŁY

ROK 1989 ZESZYT 5

WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK · ŁÓDŹ
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

WYKAZ ZESZYTÓW
PRZEGLĄDU ZAGRANICZNEJ LITERATURY GEOGRAFICZNEJ

za ostatnie lata

1986

1-2 **Geografia kultury**, s. 114, zł 240,–
3-4 **Geografia behawioralna**, s. 98, zł 240,–

1987

1 **Społeczna geografia medyczna**, s. 156, zł 240,–
2 **Teledetekcja w rolnictwie**, s. 203, zł 240,–
3-4 **Śródziemnomorska Konferencja Międzynarodowej Unii Geograficznej. Hiszpania 1986**, s. 116, zł 480,–

1988

1 **Współczesna geografia francuska**, cz. I, s. 204, zł 240,–
2-3 **Współczesna geografia francuska**, cz. II, s. 274, zł 480,–
4 **Próby ujęć globalnych**, s. 200, zł 240,–

1989

1 **Problemy standaryzacji nazw geograficznych**, s. 132, (w druku)
2 **Geografia percepcji**, s. 198, (w druku)

http://rcin.org.pl

ZRÓŻNICOWANIE TRANSPORTU ZAWIESINY W KARPACKIEJ CZĘŚCI DORZECZA WISŁY

http://rcin.org.pl

POLISH ACADEMY OF SCIENCES
INSTITUTE OF GEOGRAPHY AND SPATIAL ORGANIZATION

ADAM ŁAJCZAK

DIFFERENTIATION OF SUSPENDED MATTER TRANSPORTATION IN THE CARPATHIAN PART OF THE VISTULA CATCHMENT

YEAR 1989 FASC. 5

WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK · ŁÓDŹ
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

http://rcin.org.pl

POLSKA
AKADEMIA
NAUK

INSTYTUT GEOGRAFII
I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA

DOKUMENTACJA GEOGRAFICZNA

ADAM ŁAJCZAK

ZRÓŻNICOWANIE TRANSPORTU ZAWIESINY W KARPACKIEJ CZĘŚCI DORZECZA WISŁY

ROK 1989 ZESZYT 5

WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK · ŁÓDŹ
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

http://rcin.org.pl

KOMITET REDAKCYJNY

Redaktor Naczelny: Jerzy Grzeszczak
Członkowie: Maria Ciechocińska, Tadeusz Gerlach,
Alina Potrykowska, Józef Skoczek, Władysława Stola
Sekretarz: Maria Mozolewska-Adamczyk

Adres Komitetu:

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania
Polskiej Akademii Nauk
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa

Maszynopis niniejszego numeru przekazano Wydawcy 23 grudnia 1988

Redaktor Wydawnictwa Hanna Jurek

Redaktor techniczny Ryszard Ulanecki

Printed in Poland

Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo. Wrocław 1989.
Nakład 420 egz. Objętość: ark. wyd. 6,80; ark. druk. 5,38+3 wkl. ark. A_1-7,16.
Papier offset., kl. III, 70 g, 70×100. Oddano do składania 1989.03.24.
Podpisano do druku 1989.11.03. Druk ukończono w lutym 1990.
Wrocławska Drukarnia Naukowa. Zam. 4135/89. F-4.

http://rcin.org.pl

SPIS TREŚCI

Przedmowa – *Kazimierz Klimek* 7
Wstęp 8
Zarysowanie problemu 8
Cel i zakres pracy 10
Teren badań 11
Stan badań 14
Materiały wyjściowe i metoda obliczeń 19
Mechanizm transportu zawiesiny a warunki prawidłowego pomiaru zmącenia . . . 19
Ocena metod pomiarów i obliczeń transportu zawiesiny 21
Ocena wyników w świetle zastosowanej metody obliczeń 22
Parametry transportu 27
Parametry fizycznogeograficzne zlewni, parametry rzek 28
Korelacja parametrów 30
Hydrometeorologiczne cechy okresu badań 35
Transport zawiesiny w karpackiej części dorzecza Wisły 38
Transport zawiesiny na tle wybranych obszarów 38
Rola Karpat w dostawie zawiesiny do górnej Wisły 39
Transport zawiesiny w profilu podłużnym Wisły 42
Zmącenie 44
Natężenie transportu podczas wezbrań 49
Masa transportu 52
Jednostkowa denudacja odpływowa 57
Wpływ wielkości zlewni na transport zawiesiny 59
Oddziaływanie zbiorników zaporowych na przepływ zawiesiny 60
Zastosowanie metod taksonomicznych w analizie przestrzennego zróżnicowania transportu 62
Przestrzenne zróżnicowanie erozji i sedymentacji wezbraniowej w świetle transportu zawiesiny 65
Morfodynamiczna analiza odprowadzania zawiesiny ze zlewni karpackich na tle reżimu odpływu wody 69
Kierunki zmian w natężeniu erozji i sedymentacji wezbraniowej 71
Uwagi końcowe i wnioski 73
Literatura 75
Differentiation of suspended matter transportation in the Carpathian part of the Vistula catchment (summary) 79
Дифференциация транспорта взвешенных наносов в карпатской части речного водосбора Вислы (резюме) 82

http://rcin.org.pl

http://rcin.org.pl

PRZEDMOWA

W strefie klimatów umiarkowanych o dużej roli morfogenetycznej wód płynących znaczna część drobnoklastycznych produktów wietrzenia przenoszona jest w formie zawiesiny. W obszarach górskich lub wyżynnych, zbudowanych z podatnych na wietrzenie skał podłoża, zawiesinowy ładunek rzek jest dominujący w stosunku do ładunku dennego. Zjawisko to skłania wielu hydrologów, geomorfologów, gleboznawców jak również przedstawicieli innych dyscyplin naukowych do szczegółowego poznania przestrzennej i czasowej zmienności jego transportu.

W ostatnich dziesięcioleciach w kilku małych zlewniach dorzecza górnej Wisły, o powierzchniach kilku-kilkudziesięciu km^2, proces transportu zawiesiny badany jest za pomocą licznych instalacji lub urządzeń rejestrujących. Dotychczasowe wyniki tych badań są bardzo obiecujące. Ujawniają one interesujące relacje pomiędzy różnymi elementami środkowiska przyrodniczego a wielkością i czasową zmiennością odprowadzanej zawiesiny. Są one jednak trudno porównywalne.

Duże dorzecza, o powierzchni kilku-kilkudziesięciu tysięcy km^2, są mało wdzięcznym obiektem dla tego typu badań. Niemożliwość instalacji większej liczby przyrządów pomiarowych, rzadka sieć obserwacyjna służby hydrologicznej oraz niesynchroniczne ciągi obserwacyjne nie zachęcają do podejmowania takich badań. W wyniku tego powstał wyraźny dysonans pomiędzy bardzo dobrą znajomością tego procesu w małych zlewniach przy niemożliwości uogólnienia wyników badań na większe dorzecza lub regiony przyrodnicze.

Tę lukę próbuje wypełnić rozprawa dr. A. Łajczaka. Autor przeprowadził analizę transportu zawiesiny w dorzeczu górnej Wisły o powierzchni ponad 51 000 km^2, obejmującym różne jednostki orograficzno-przyrodnicze i w różnym stopniu zagospodarowane przez człowieka. Analizę tę oparł na wynikach pomiarów 37 posterunków pomiarowych sieci IMGW, mających przeważnie dwudziestoletnie, a niekiedy tylko dziesięcioletnie ciągi obserwacyjne. Uzyskane wyniki przybliżają czytelnikowi problem transportu zawiesiny w tak dużym dorzeczu.

Kazimierz Klimek

http://rcin.org.pl

WSTĘP

ZARYSOWANIE PROBLEMU

Modelowanie obszarów górskich w warunkach klimatu umiarkowanego następuje głównie pod wpływem wód płynących. W obszarach o słabo przepuszczalnym podłożu zasadniczą funkcję nosiciela energii spełnia odpływ powierzchniowy formujący się podczas opadów deszczu a także roztopów. Produkty erozji zlewni są transportowane w postaci materiału rozpuszczonego, unoszonego i dennego.

Przeważającą część rumowiska klastycznego transportowanego w rzekach odwadniających młode góry o dużej energii rzeźby stanowi materiał unoszony, stosunkowo łatwo podlegający pomiarom. W obszarach zbudowanych z utworów podatnych na erozję (luźne pyły i gliny, utwory typu molasy, utwory wulkaniczne, flisz) udział tego materiału w odpływie całości rumowiska klastycznego jest już dominujący. Potwierdzają to wyniki badań prowadzonych w różnych strefach morfoklimatycznych (Fournier 1960; Strakhov 1967; Holeman 1968; Froehlich 1975, 1982; Lwowicz 1979; Wang Lixian i in. 1980; Jansson 1982; Walling, Webb 1983), np. w polskich Karpatach fliszowych udział materiału unoszonego szacuje się na 85-95% odpływu rumowiska klastycznego (Cyberski 1969; Froehlich 1975, 1982). Wzrostowi transportu materiału unoszonego sprzyjają wysokie opady, tektoniczne ruchy podnoszące, mobilność sejsmiczna, intensywne ruchy masowe (*Study*... 1979; Li Jian, Luo Defu 1980; Froehlich, Starkel 1987), a przede wszystkim wylesianie stoków i zajęcie ich pod uprawy (Goreckaja 1974; Starkel 1977 a; Jansson 1982).

W warunkach rolniczo użytkowanych stoków górskich strefa graniczna w profilu zwietrzelinowo-glebowym, powyżej której odpływ wody i erodowanej masy mineralnej jest szybki, leży płytko. W tej sytuacji zachodzi przyspieszone denudowanie stoków (Starkel 1977a). Ten przyspieszony odpływ wody i zwietrzelin ze stoków wzmaga gwałtowność wezbrań i erozję koryt rzecznych, co stwierdza się w polskich Karpatach (Klimek, Trafas 1972; Klimek 1974a, 1987). Jednakże powszechność występowania młodych form erozyjnych i denudacyjnych, nawet w zalesionych obszarach Karpat fliszowych (Starkel 1960), może informować, że transport rumowiska w rzekach osiągał chwilowo w holocenie duże rozmiary (Starkel 1977a, b; Maruszczak 1984b), jeszcze przed okresem wzmożonej działalności człowieka, która rozpoczęła się w tym obszarze

http://rcin.org.pl

w XVIII i XIX w. Znajduje to potwierdzenie w miąższych seriach mad holoceńskich, zdeponowanych nie tylko na przedpolu Karpat (Klimek 1974a, b; Starkel 1977a, b), ale nawet w głębi gór o dużym zalesieniu (Starkel 1977a, 1980).

Zwiększone współczesne natężenie odpływu materiału klastycznego ze zlewni górskich, pochodzącego z linijnej erozji stoków i z erozji koryt rzecznych (Froehlich 1982; Klimek 1987), stwierdzane w różnych obszarach w skali globalnej (Jansson 1982) może być ocenione tylko w wyniku coraz bardziej powszechnego zastosowania ilościowych metod badawczych. Znajomość natężenia transportu materiału unoszonego w rzekach pozwala wnioskować o erozji w zlewniach (Nippes 1974; Gładki 1978) i sedymentacji w dnach dolin, szczególnie na nizinnym przedpolu gór (Brański 1975; Brański i in. 1980). W polskich Karpatach informacje o odpływie materiału unoszonego ze zlewni o powierzchni rzędu $10^2 - 10^4$ km^2 mogą już pośrednio informować o względnym zróżnicowaniu natężenia erozji między zlewniami o różnym zalesieniu i rolniczym użytkowaniu. Takie informacje są jednak możliwe do uzyskania tylko w przypadku posiadania wyników pomiarów zmącenia rzek, pochodzących ze stacjonarnych wieloletnich badań. Eksperymentalne pomiary spływu wody i transportowanego materiału, prowadzone w górach w małych zlewniach i na poletkach doświadczalnych, szczegółowo naświetlają mechanizm tych procesów (Słupik 1973; Froehlich 1975, 1982; Gil 1976).

Masa transportu materiału unoszonego obliczana w profilach pomiaru zmącenia rzek, odpływająca w badanych przedziałach czasu (miesiące, lata, wielolecie), stanowi rezultat złożonego obiegu materii w zlewni (Einstein 1964). Nie może więc być utożsamiana z całkowitą masą rumowiska podlegającą etapowym przemieszczeniom w zlewni (Starkel 1972; Froehlich 1982; Słupik 1986) oraz z rozmiarami erozji w zlewni. Tylko część erodowanego materiału szybko dociera do koryta rzeki i odpływa poza profil pomiarowy, względna wielkość transportu rumowiska unoszonego maleje z biegiem rzeki (Roehl 1962; Figuła 1966; Gerlach 1976; Gil 1976; Trimble 1977; Wiliams 1977; Wang Lixian i in. 1980; Walling, Webb 1983; Maruszczak 1984a). Rozmiary strat w wodnym transporcie zwietrzelin w zlewni określa parametr DR (sediment delivery ratio) informujący, jaki procent materiału uruchamianego w zlewni odpływa poza profil kontrolny. Wielkość współczynnika DR w zlewniach o powierzchni od 10^2 do 10^4 km^2 (z wyjątkiem lessowych) wynosi najczęściej od kilku do kilkunastu procent (Walling, Webb 1983). Podobne wartości należy przyjąć w zlewniach w polskich Karpatach. Oznacza to, że rozmiary erozji w zlewniach większych rzek tego obszaru mogą być od około 5 do 20 razy większe od masy odpływającego materiału unoszonego. Wprowadzony przez J. Tricarta (1962) termin „denudacja netto" oraz przez J. Brańskiego (1975, 1980) termin „denudacja odpływowa" określają charakter rozważań nad natężeniem powierzchniowej erozji w zlewniach bazujących tylko na podstawie znanych mas transportu materiału unoszonego przepływającego przez profile pomiarowe.

http://rcin.org.pl

W związku z postępującą w skali globalnej erozją gleb, która w niektórych obszarach osiągnęła katastrofalne rozmiary, konieczne się staje sporządzanie analiz i map transportu materiału unoszonego w obszarach o zróżnicowanym użytkowaniu ziemi i litologii podłoża w różnych strefach morfoklimatycznych. Tak zarysowana problematyka wchodzi w zakres badań Międzynarodowej Asocjacji Nauk Hydrologicznych (IAHS) i działającej w jej obrębie Komisji Erozji Kontynentalnej.

W rozważaniach nad natężeniem transportu materiału unoszonego w warunkach zróżnicowanej antropopresji interesującym obszarem jest karpacka część dorzecza Wisły. Stosunkowo gęsta sieć posterunków z wynikami wieloletnich pomiarów zmącenia rzek może stanowić podstawę oceny natężenia transportu materiału unoszonego w poszczególnych rzekach. Efektem pośrednich rozważań może być ocena natężenia erozji w zlewniach o zróżnicowanym użytkowaniu i litologii podłoża.

W literaturze są stosowane różne pojęcia określające drobne frakcje zwietrzelin transportowanych w rzekach w postaci unoszonej. W literaturze hydrologicznej używa się pojęć: materiał unoszony, unosiny, które charakteryzują dynamikę tego materiału w wodach płynących. W literaturze geomorfologicznej stosowany jest natomiast termin zawiesina, którego znaczenie w literaturze hydrologicznej jest odmienne.

CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest wykazanie i zanalizowanie przestrzennych różnic w natężeniu oraz w sezonowej i wieloletniej zmienności transportu zawiesiny w większych rzekach polskich Karpat i ich nizinnego przedpola, w nawiązaniu do cech środowiska fizycznogeograficznego zlewni i stopnia antropopresji. Scharakteryzowany w taki sposób transport zawiesiny może stanowić podstawę oceny natężenia i przebiegu erozji w badanych zlewniach. Tak postawiony cel pracy został zrealizowany w wyniku zastosowania różnych metod obliczeniowych. Efekt obliczeń stanowią parametry transportu zawiesiny, parametry fizycznogeograficzne zlewni i parametry rzek. Korelacja parametrów transportu zawiesiny z pozostałymi parametrami pozwala wytłumaczyć przyczyny zróżnicowanego przestrzennie i czasowo natężenia odpływu zawiesiny ze zlewni rzek karpackich. Analizą objęto rzeki II i III rzędu hydrologicznego, a przestrzenna charakterystyka zjawisk jest limitowana przez działy wodne zlewni wyznaczone przez profile pomiaru zmącenia rzek. Z tych względów obliczone wartości parametrów charakteryzują bezpośrenio transport tylko w profilach pomiarowych i w wyznaczonych przez nie zlewniach.

W pracy szczególną uwagę zwrócono na przestrzenne zróżnicowanie natężenia i wielkości transportu zawiesiny w nawiązaniu do użytkowania ziemi. Statystyczna analiza wartości parametrów określających użytkowanie ziemi w zlewniach oraz parametrów transportu zawiesiny wyjaśnia przyczyny wzrostu odpływu zawiesiny z wylesionych i rolniczo użytkowanych zlewni karpackich.

http://rcin.org.pl

Wartości parametrów transportu zawiesiny obliczane zgodnie z instrukcją obowiązującą w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) są często krytykowane w literaturze. Krytyka ta wynika z niedostatecznej metodyki pomiarowej, a także ze stosowanej metodyki obliczeniowej. W tej sytuacji zaproponowano inny sposób obliczania parametrów transportu zawiesiny.

Zakres pracy obejmuje następujące główne zagadnienia w skali karpackiej części dorzecza Wisły:

— przestrzenne zróżnicowanie oraz sezonowa i wieloletnia zmienność natężenia transportu zawiesiny w rzekach, jako efekt erozji w zlewniach;

— oszacowanie istniejącego i prognozowanego tempa zamulania zbiorników zaporowych oraz wykazanie zmian w reżimie odpływu zawiesiny w rzekach, wywoływanych przez zabudowę hydrotechniczną;

— próba zastosowania metod taksonomicznych w analizie przestrzennego zróżnicowania wartości parametrów transportu;

— wyprowadzenie związków ilościowych między parametrami transportu zawiesiny a parametrami fizycznogeograficznymi zlewni i parametrami rzek.

Wykorzystanie bogatego materiału obserwacyjnego IMGW, a także zastosowanie różnych metod obliczeniowych oraz matematyczno-statystycznej analizy wyników wymagało przeprowadzenia części obliczeń z wykorzystaniem elektronicznej techniki obliczeniowej.

* * *

Praca została wykonana w Zakładzie Ochrony Przyrody i Zasobów Naturalnych Polskiej Akademii Nauk w Krakowie w latach 1982—1986 pod kierunkiem prof. dr. hab. K. Klimka, któremu pragnę w tym miejscu wyrazić słowa gorącego podziękowania za zachętę do napisania pracy, opiekę, okazaną życzliwość oraz rady i uwagi. Wyrazy podziękowania składam recenzentom pracy prof. dr. hab. Z. Mikulskiemu i doc. dr. hab. W. Froehlichowi za udzielone mi rady i wskazówki. Pragnę również podziękować doc. dr. hab. B. Obrębskiej-Starklowej, prof. dr. hab. L. Starklowi, prof. dr. hab. J. Skibińskiemu, dr. J. Brańskiemu i dr. M. Madeyskiemu za liczne rady i krytyczne uwagi.

Prezentowana praca jest streszczeniem rozprawy doktorskiej znajdującej się w Bibliotece Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN w Warszawie. Zagadnienia nie uwzględnione w tej pracy będą przedmiotem odrębnych publikacji. Szczupłe ramy publikacji zmusiły również autora do zaprezentowania jedynie części materiału ilustracyjnego i tabelarycznego.

TEREN BADAŃ

Charakterystykę poszczególnych komponentów środowiska fizycznogeograficznego obszaru badań zastąpiono ogólnymi informacjami o potencjalnych warunkach wodnego transportu zwietrzelin.

Karpacka część dorzecza Wisły, z wyłączeniem Tatr, ma cechy rzeźby

http://rcin.org.pl

średniogórsko-pogórsko-nizinnej o skrajnych deniwelacjach do 1500 m i znajduje się w zasięgu 4 pięter klimatycznych od umiarkowanie ciepłego do bardzo chłodnego. Obszar ten pomimo pozornych podobieństw krajobrazowych cechuje się dużym zróżnicowaniem parametrów fizycznogeograficznych zlewni. Dotyczy to również koryt rzecznych (Klimek 1979), co może informować o zróżnicowanym natężeniu transportu rumowiska w rzekach. Analizowany obszar odznacza się cechami przejściowymi między klimatem oceanicznym i kontynentalnym, co uwidacznia się nie tylko w reżimie odpływu wody, lecz także zawiesiny w rzekach (Froehlich 1975). Istotny wpływ na reżim odpływu wody i zawiesiny wywiera również wysokość npm. i przeważająca ekspozycja stoków w zlewniach.

W warunkach słabo przepuszczalnego podłoża fliszowego zlewni karpackich głównym czynnikiem powodującym transport klastycznych zwietrzelin i materiału organicznego w zlewniach jest odpływ powierzchniowy. W wyniku zmian w obiegu wody w Karpatach, wywołanych wylesieniem stoków i wprowadzeniem upraw ziemniaka, przeważnie na glebach pylasto-piaszczystych o największej podatności erozyjnej (Słupik 1973), podstawowym obszarem intensywnej dostawy zwietrzelin do rzek stały się linijnie rozcinane stoki (Klimaszewski 1935; Figuła 1966; Froehlich 1975, 1982; Gil 1976; Froehlich, Słupik 1980, 1986). Innym ważnym źródłem dostawy zwietrzelin do wód rzecznych są koryta rzek przemodelowywane podczas wezbrań i lokalnie szybko pogłębiane (Klimek 1987). Wzrost gwałtowności odpływu wody z małych zlewni beskidzkich spowodowany ich wylesieniem znajduje odzwierciedlenie we wzroście natężenia procesów fluwialnych.

We wschodniej, beskidzkiej części polskich Karpat w wyniku zmian ludnościowych po 1949 r. powierzchnia gruntów ornych została zredukowana do minimum przy równoczesnym wzroście zalesienia. Jest to jedyny fragment Karpat, gdzie zaistniały warunki do zmniejszenia dostawy zwietrzelin do rzek (Klimek 1979). Współczesne zróżnicowanie użytkowania ziemi może stanowić tło dla charakterystyki porównawczej transportu zawiesiny w poszczególnych rzekach badanego obszaru (Gładki 1978).

Natężenie erozji i transportu fluwialnego w dorzeczu Wisły wykazuje duże zróżnicowanie przestrzenne, osiągając największe rozmiary w karpackiej części dorzecza (Reniger 1959; Dębski 1959; Brański 1975; Maruszczak 1984a). Duże natężenie transportu zawiesiny w karpackiej części dorzecza Wisły wynika nie tylko ze wzmożonej erozji stoków i koryt rzecznych, ale również z wysokiej kompetencji tych rzek. W skali wielolecia podstawowym obszarem zasilania rzek karpackich w zawiesinę są linijnie rozcinane stoki fliszowe, np. w małej zlewni w Beskidzie Sądeckim udział stoków w zasilaniu cieku w zawiesinę wynosi około 80% (Froehlich 1982).

Potencjalne warunki wodnego transportu drobnych zwietrzelin w zlewniach karpackich można scharakteryzować według następującego schematu:

– warunki erozji i wodnego odprowadzania zwietrzelin ze stoków;
– możliwości dostawy zwietrzelin do koryt rzecznych;

http://rcin.org.pl

— możliwości erozji koryt rzecznych oraz fluwialnego transportu zwietrzelin.

Warunki erozji stoków i odprowadzania zwietrzelin do den dolin określają parametry fizycznogeograficzne zlewni, które można podzielić na dwie grupy: parametry, których wpływ na wielkość i natężenie transportu zawiesiny jest wprost proporcjonalny oraz parametry, których wpływ jest odwrotnie proporcjonalny. Do pierwszej grupy zaliczamy: powierzchnię zlewni, powierzchnię gruntów ornych w zlewni, podatność erozyjną gleb, średnie nachylenie stoków w zlewni (tzw. stoczystość), wielkość opadów, przepływu rzek i odpływu jednostkowego w zlewniach. Do drugiej grupy zaliczamy lesistość zlewni.

Zasadnicze zmiany wartości parametrów fizycznogeograficznych zlewni i parametrów rzek zaznaczają się w układzie południkowym, co wynika z różnic w środowisku geograficznym Pogórza Karpackiego i Beskidów. W kierunku południowym generalnie wzrastają opady, odpływ jednostkowy, spadki, lesistość, zwiększa się współczynnik rozwinięcia lesistości zlewni. W kierunku północnym zwiększa się z kolei powierzchnia zlewni, powierzchnia gruntów ornych w zlewniach, wzrasta podatność erozyjna gleb, zwiększa się współczynnik rozwinięcia powierzchni gruntów ornych w zlewniach, zwiększają się przepływy rzek. Drugorzędne zmiany tych parametrów zaznaczają się w układzie równoleżnikowym. W kierunku wschodnim zwiększa się przede wszystkim szerokość strefy Pogórza wyścielonego najbardziej podatnymi na erozję pokrywami zwietrzelinowo-glebowymi (lessy, utwory lessopodobne) i zajętego głównie przez grunty orne. W Beskidach natomiast powierzchnia zajęta pod grunty orne na ogół maleje w kierunku wschodnim. Przestrzenne zróżnicowanie wielkości i natężenia transportu zawiesiny w zlewniach karpackich dopływów Wisły stanowi efekt sumarycznego oddziaływania wymienionych komponentów.

Odpływający ze stoków materiał zwietrzelinowy tylko częściowo dociera do koryt cieków, głównie wzdłuż dróg polnych i leśnych, a także wzdłuż bruzd i rozcięć erozyjnych. W przypadku wąskich den dolin (1—3 wg Strahlera) zdecydowana większość tego materiału dopływa do koryt. W szerokich dnach dolin zwiększają się rozmiary depozycji materiału u podnóży stoków (Starkel 1972). Stąd minimalna rola przyrzeczy w dostawie materiału zawiesinowego do potoków i rzek karpackich (Froehlich 1982).

Zdolność rzek do transportu zawiesiny jest określona przez minimalną prędkość spływu wód korytowych, przy której cząstki zawiesiny nie opadają i mogą być wynoszone poza profil pomiarowy. Jest to prędkość transportowa (nie zamulająca), która w przypadku cząstek o średnicy do 2 mm wynosi według różnych autorów maksymalnie 0,4 $m \cdot s^{-1}$. Obliczone przeciętne prędkości płynięcia wody wzdłuż profilów podłużnych analizowanych rzek wskazują, że wartość ta w przypadku średniej prędkości $v_{śr}$ w profilu pomiarowym jest już przekroczona przy przepływach średnich, a w przypadku prędkości maksymalnych v_{max} w nurcie nawet podczas przepływów niskich. Podczas większych przepływów, zwłaszcza przy SWQ reprezentującym uśred-

http://rcin.org.pl

niony kulminacyjny przepływ wezbraniowy rzek karpackich, kiedy transportowane są największe ilości materiału zawiesinowego, wartość $v_{śr}$ wynosi w karpackich odcinkach rzek 2,0–4,3 $m \cdot s^{-1}$. Jedynie odcinki rzek w rozległych kotlinach i we wschodniej części Pogórza Karpackiego charakteryzują się $v_{śr} < 2{,}0\ m \cdot s^{-1}$. W Kotlinie Sandomierskiej $v_{śr}$ jest nawet mniejsze od 1,5 $m \cdot s^{-1}$.

Podczas przepływów wezbraniowych, kiedy rzeki karpackie transportują dominującą część rocznej masy zawiesiny, wzdłuż całego ich biegu istnieją sprzyjające warunki do dalekiego odprowadzania tego materiału. Badania młodoholoceńskich aluwiów oraz świeżych osadów powodziowych wskazują, że w odcinkach rzek o dużych prędkościach spływu wód część materiału zawiesinowego transportowanego podczas wezbrań ulega strąceniu na terasach. Tylko w warunkach przepływu pozakorytowego istnieją warunki do większej sedymentacji tego materiału. Najbardziej sprzyjające warunki do takiego strącania zawiesiny, poza górną Wisłą płynącą dnem Kotliny Oświęcimskiej i Kotliny Sandomierskiej, istnieją w dolnych odcinkach Wisłoka i Sanu.

Sedymentacja pozakorytowa zawiesiny z wód wezbraniowych może zachodzić tylko w warunkach stosunkowo niegłębokiego koryta. Jeżeli koryto długo ulegało systematycznemu pogłębianiu, nawet duże przepływy mogą mieścić się w profilu koryta; sedymentacja pozakorytowa zawiesiny występuje w takich warunkach rzadko. Sytuacja taka istnieje w strefie wylotu rzek z Pogórza Karpackiego, gdzie pogłębienie koryt przekroczyło w ostatnich 100 latach nawet 3 m (Punzet 1981; Klimek 1987).

Prędkość spływu wód w korytach rzek karpackich przekracza podczas wezbrań wartość tzw. prędkości poruszającej, nawet w odniesieniu do frakcji żwirowej. W efekcie erozji dna i obróbki transportowanego rumowiska dennego następuje dodatkowa dostawa materiału zawiesinowego. Ten sposób dostawy zawiesiny, pomimo często pozornie stabilnego koryta, występuje na dużą skalę wzdłuż całego biegu rzek karpackich.

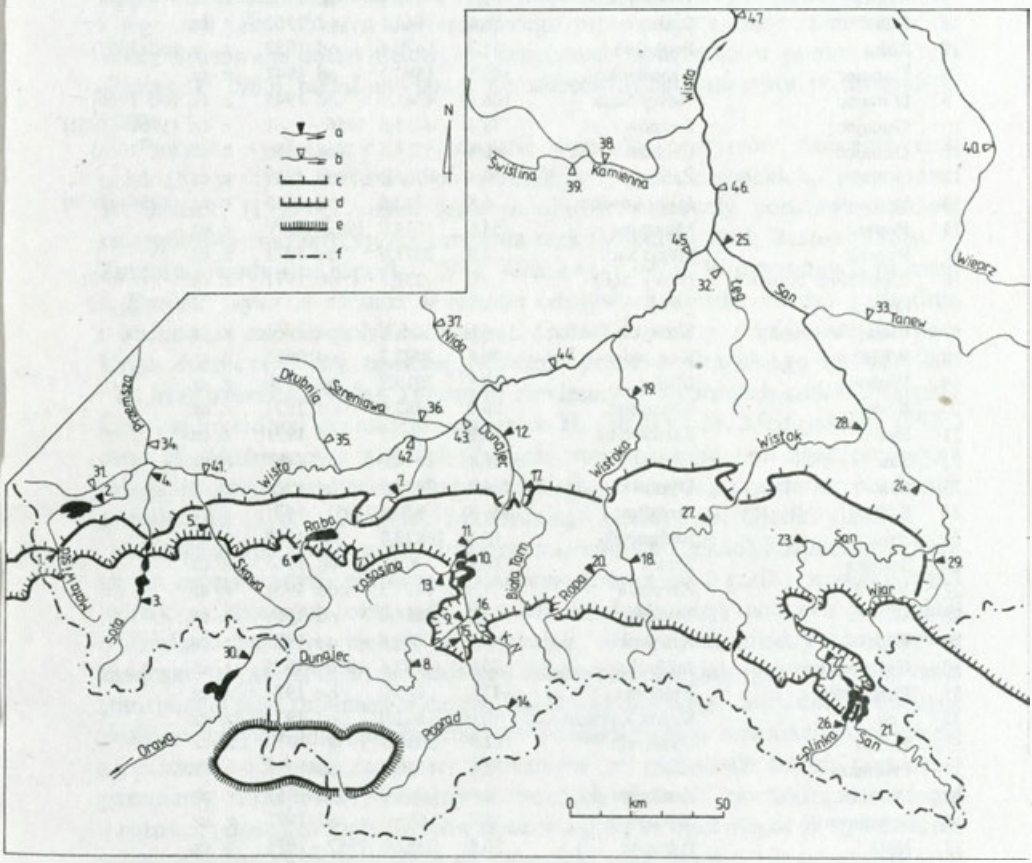
Warunki orograficzne i hydrologiczne decydują, że w Beskidach i w zachodniej części Pogórza Karpackiego straty w transporcie zawiesiny na drodze: stok – dno doliny – koryto cieku – odpływ poza profil pomiarowy są mniejsze, aniżeli we wschodniej części Pogórza i w Kotlinie Sandomierskiej. Dlatego obliczone wielkości transportu zawiesiny powinny być w pierwszym obszarze bliższe rzeczywistym rozmiarom odpływu erodowanego materiału ze stoków (większa wartość współczynnika *DR*), niż w drugim obszarze. Jednakże intensywna erozja koryt w środkowych częściach dorzeczy Wisłoki i Sanu rekompensuje straty w transporcie zawiesiny.

STAN BADAŃ

Karpacka część dorzecza Wisły charakteryzuje się najlepszym rozpoznaniem transportu zawiesiny w Polsce. Pierwsze regularne lub wyrywkowe pomiary rozpoczęto na tym obszarze w okresie międzywojennym. Po 1945 r.

http://rcin.org.pl

nastąpił intensywny rozwój badań transportu, które obecnie są prowadzone w dwóch kierunkach. Pierwszy opiera się na wynikach standardowych pomiarów Państwowej Służby Hydrologicznej, drugi zaś na wynikach specjalnych badań ruchu rumowiska, najczęściej w małych zlewniach. Tylko wyniki pomiarów Państwowej Służby Hydrologicznej, choć mniej dokładne od wyników drugiej grupy badań, mogą stanowić podstawę analizy przestrzennego zróżnicowania transportu zawiesiny w polskich Karpatach.



Ryc. 1. Rozmieszczenie posterunków Państwowej Służby Hydrologicznej służących do pomiaru zmącenia rzek w dorzeczu górnej Wisły

a – posterunki zlokalizowane na karpackich dopływach Wisły; b – posterunki zlokalizowane na nizinnych i wyżynnych dopływach Wisły oraz na górnej i częściowo środkowej Wiśle, c – krawędź Pogórza Karpackiego; d – granica Beskidów; e – granica Tatr; f – granica dorzecza Wisły w Karpatach i w Kotlinach Podkarpackich; numeracja profilów jak w tabeli 1

Location of the turbidity recording posts of the State Hydrological Service in the upper Vistula catchment

a – post located on the Carpathian tributaries of the Vistula; b – post located on the lowland and upland tributaries of the Vistula, and on the upper and middle Vistula; c – edge of the Carpathian Foothills; d – edge of the Beskidy Mts., e – edge of the Tatra Mts., f – border of the Vistula catchment in the Carpathians and in the Sub-Carpathians Basins; profile numbering scheme as in Table 1

http://rcin.org.pl

Tabela 1

Charakterystyka posterunków pomiaru zmącenia Państwowej Służby Hydrologicznej w dorzeczu górnej Wisły

lp.	Rzeka	Posterunek pomiarowy	Bieg rzeki (w km)	A (w km²)	Okres pomiaru zmącenia	Częstotliwość pomiarów zmącenia
1	Mała Wisła	Skoczów	71,1	296,7	od 1956	z. cz. (1966–1976)
2	Mała Wisła	Goczałkowice	37,8	738,1	od 1956	z. cz.
3	Soła	Żywiec	50,2	784,8	od 1953	z. cz. (od 1967)
4	Soła	Oświęcim	3,0	1386,0	od 1953	z. cz.
5	Skawa	Wadowice	21,1	835,4	od 1956	z. cz.
6	Raba	Stróża	80,6	644,1	od 1961	z. cz.
7	Raba	Proszówki	21,7	1470,4	od 1952	z. cz. (od 1967)
8	Dunajec	Krościenko	149,2	1580,3	od 1947	z. cz.
9	Dunajec	Nowy Sącz	106,8	4341,0	od 1945	z. cz. (od 1966)
10	Dunajec	Rożnów	78,4	4865,8	1956–1981	z. cz. (1964–1981)
11	Dunajec	Czchów	66,8	5316,4	od 1956	z. cz. (od 1964)
12	Dunajec	Żabno	17,4	6735,0	od 1957	z. cz.
13	Łososina	Jakubkowice	6,8	342,6	od 1959	z. cz. (1964–1978)
14	Poprad	Muszyna	54,6	1514,0	1952–1970	z. cz.
15	Poprad	Stary Sącz	2,9	2071,0	od 1971	z. cz.
16	Kamienica Nawojowska	Nowy Sącz	1,0	237,7	od 1971	z. cz.
17	Biała Tarnowska	Koszyce Wielkie	6,6	956,9	od 1958	z. cz.
18	Wisłoka	Krajowice	98,4	2092,2	od 1955	z. cz.
19	Wisłoka	Mielec	19,1	3915,3	od 1956	z. cz.
20	Ropa	Klęczany	26,9	482,9	od 1971	z. cz.
21	San	Zatwarnica	368,9	490,5	od 1971	z. cz.
22	San	Lesko	301,8	1614,0	od 1961	z. cz.
23	San	Dynów	234,9	2943,5	od 1954	z. cz.
24	San	Jarosław	119,8	7040,6	1957–1971	z. cz.
25	San	Radomyśl	10,3	16823,8	od 1949	z. cz.
26	Solinka	Terka	16,8	309,8	od 1966	z. cz.
27	Wisłok	Żarnowa	91,3	1427,3	od 1961	z. cz.
28	Wisłok	Tryńcza	5,8	3516,0	od 1958	z. cz.
29	Wiar	Krówniki	3,4	788,9	od 1971	z. cz.
30	Czarna Orawa	Jabłonka	25,7	135,4	1956–1975	z. cz.
31	Pszczynka	Pszczyna	17,6	185,0	od 1971	z. cz.
32	Łęg	Kępie Zaleszańskie	10,0	822,0	od 1971	z. cz.
33	Tanew	Harasiuki	17,8	2034,0	1958–1970	z. cz.
34	Przemsza	Jeleń	12,8	1996,0	od 1955	z. cz.
35	Dłubnia	Zesławice	6,8	264,0	od 1953	z. cz.
36	Szreniawa	Biskupice	8,8	682,0	od 1971	z. cz.
37	Nida	Pińczów	56,8	3352,0	1957–1975	z. cz.
38	Kamienna	Kunów	66,2	1106,0	od 1960	z. cz.
39	Świślina	Nietulisko Duże	2,9	405,0	od 1972	z. cz.
40	Wieprz	Krasnystaw	197,6	3001,0	od 1952	z. cz.
41	Wisła	Smolice	23,3	6796,0	1972–1977	z. cz.
42	Wisła	Sierosławice	130,5	8999,0	od 1971	z. cz.
43	Wisła	Jagodniki	153,1	12058,0	od 1958	z. cz.
44	Wisła	Szczucin	194,1	23901,0	od 1953	z. cz.
45	Wisła	Sandomierz	268,4	31846,0	od 1972	z. cz.
46	Wisła	Annopol	298,4	51518,0	od 1971	z. cz.
47	Wisła	Puławy	372,5	57264,0	od 1945	z. cz.

Objaśnienia: tabela zawiera dane o posterunkach, w których pomiary zmącenia były prowadzone przez co najmniej 10 lat; w nawiasach podano lata, kiedy pomiary były prowadzone codziennie; z. cz. – zróżnicowanie częstotliwości.

http://rcin.org.pl

W karpackiej części dorzecza Wisły łącznie z jej górnym biegiem funkcjonuje obecnie 41 posterunków pomiaru zmącenia IMGW, co stanowi 38% ogólnej liczby tych posterunków w Polsce. Wyniki codziennych pomiarów zmącenia i przepływu z tych posterunków stanowią podstawę niniejszej pracy. Lokalizację analizowanych posterunków pomiarowych przedstawia rycina 1, a ich charakterystykę tabela 1. Łączna powierzchnia zlewni cząstkowych w analizowanym obszarze wyznaczonych przez posterunki pomiaru zmącenia, łącznie ze zlewnią Czarnej Orawy, wynosi 32 039 km^2. Duża choć niezadowalająca koncentracja posterunków pomiaru zmącenia w tym obszarze, wynika z jego roli jako obszaru dostarczającego przeważającą część rumowiska do Wisły. Stosowana dotąd metodyka pomiarowa i obliczeniowa, pomimo krytyki (Pasławski 1965), nadal nawiązuje do zaleceń byłego Instytutu Hydrograficznego.

Pierwsze syntetyczne opracowanie wyników pomiarów zmącenia rzek polskich, w tym stosunkowo szczegółowo rzek karpackich, przedstawił W. Jarocki (1957). Dłuższe serie pomiarów stanowiły podstawę bardziej szczegółowej charakterystyki zmącenia rzek (Mikulski 1961; Brański 1968a, b; Zmącenie wody i transport... 1972; Wiśniewski 1972). W cytowanych pracach J. Brański wykazał różnice w reżimie odpływu zawiesiny między zachodnią i wschodnią częścią polskich Karpat. Ocenę denudacji odpływowej karpackiego dorzecza Wisły zawierają głównie prace J. Brańskiego (1975, 1980) i H. Maruszczaka (1984a). Transport zawiesiny w wybranych rzekach karpackich najdokładniej charakteryzują prace H. Gładki i M. Medeyskiego (1975) oraz H. Maruszczaka (1984b). Związki stochastyczne opisujące przeciętne relacje między przepływem wody i zawiesiny stanowią przedmiot publikacji J. Sobczaka (1965, 1966), M. Madeyskiego (1976) i H. Gładki (1979).

Druga grupa opracowań transportu zawiesiny w rzekach karpackich opiera się na zagęszczonych pomiarach zmącenia (nawet co 1 godz.) prowadzonych jednak w krótszych okresach. Badania te dostarczają cennych informacji o źródłach zasilania cieków w zawiesinę, o relacjach między transportem zawiesiny a pozostałymi składowymi transportu fluwialnego, o mechanizmie transportu i jego zmianach w czasie. Takie badania mogą dokładniej naświetlić problem wpływu gospodarczej aktywności człowieka w zlewniach górskich na zwiększenie odpływu zawiesiny. Obliczone na podstawie takich pomiarów parametry transportu zawiesiny w różnych ciekach, pochodzące na ogół z różnych i dość krótkich okresów obserwacji, są na ogół nieporównywalne, nie mogą więc być ekstrapolowane na inne cieki oraz zlewnie. Na podstawie tych szczegółowych pomiarów możliwe jest dokonanie krytycznej oceny parametrów transportu zawiesiny, obliczonych zgodnie z obowiązującymi zaleceniami Państwowej Służby Hydrologicznej.

Szczegółowe informacje o transporcie zawiesiny w rzekach i potokach beskidzkich zawarte są w wielu pracach. Do najważniejszych należy zaliczyć publikacje K. Figuły (1966), P. Prochala (1973), W. Froehlicha (1975, 1978, 1982), B. Osucha (1978), M. Madeyskiego (1983). Przyczyną wzmożonego

http://rcin.org.pl

odpływu zawiesiny ze zlewni beskidzkich jest szybki spływ wody i rumowiska po stokach wzdłuż dróg polnych i leśnych (Słupik 1973; Froehlich 1975, 1982; Froehlich, Słupik 1980, 1986). Koncentracja odpływu zawiesiny ze zlewni podczas wezbrań, szczególnie letnich, osiąga 70–95% rocznej masy transportu w małej i średniej wielkości zlewniach karpackich (Froehlich 1975, 1982; Biernat 1975; Madeyski 1983). Mechanizm transportu zawiesiny, relacje z pozostałymi składowymi odpływu fluwialnego, sezonową cykliczność transportu najpełniej charakteryzują cytowane prace W. Froehlicha, opierające się na wynikach wieloletnich szczegółowych pomiarów w zlewni Kamienicy Nawojowskiej.

Cennych informacji o natężeniu transportu zawiesiny w rzekach karpackich dostarczają pomiary zamulania zbiorników zaporowych. Bogata literatura z tego zakresu jest zebrana w pracach B. Wiśniewskiego (1969), T. Chomiaka i in. (1969), J. Cyberskiego (1969, 1984). Szybsze rzeczywiste tempo zamulania zbiorników w stosunku do wartości prognozowanych, opierających się na danych pomiarowych IMGW, wynika nie tylko z dostawy innych form rumowiska, lecz przede wszystkim z większej od ustalanej dotąd dostawy zawiesiny. Retencja zawiesiny w zbiornikach zaporowych wywołuje duże zmiany w reżimie odpływu zawiesiny w rzekach; problem ten omawiają prace autora (Łajczak 1986, 1988b).

Dokonany pobieżny przegląd literatury wskazuje na stały wzrost zainteresowania problematyką transportu zawiesiny karpackiej części dorzecza Wisły. Wyraża się to zwłaszcza podejmowaniem szczegółowych badań transportu w małych ciekach. Badania te nie mogą jednak stanowić podstawy oceny natężenia transportu zawiesiny w skali regionalnej karpackiego dorzecza Wisły (Froehlich 1986). Rozpoznanie charakterystyk ilościowych transportu zawiesiny w tym obszarze należy uznać za niezadowalające. Oszacowanie prognozy zamulania istniejących, budowanych i projektowanych zbiorników zaporowych, a także realizacja programu „Wisła" w całym dorzeczu, wymaga bardziej dokładnego rozpoznania natężenia transportu zawiesiny (Brański i in. 1980). Wieloletnie serie wyników pomiarów Państwowej Służby Hydrologicznej upoważniają do bardziej szczegółowej analizy transportu zawiesiny w karpackim dorzeczu Wisły. Analiza taka powinna być dokonana na podstawie wyników pomiarów z maksymalnie długiego okresu obserwacji zmącenia rzek z możliwie największej liczby posterunków kontrolnych. Wymogowi temu odpowiada wielolecie 1961–1980, które uznano za podstawę pracy.

http://rcin.org.pl

MATERIAŁY WYJŚCIOWE I METODA OBLICZEŃ

MECHANIZM TRANSPORTU ZAWIESINY A WARUNKI PRAWIDŁOWEGO POMIARU ZMĄCENIA

Drobne frakcje zwietrzelin transportowane w ciekach w postaci materiału zawiesinowego są nierównomiernie rozmieszczone w warstwie wody, a ich koncentracja ulega szybkim zmianom. Zmiany te dokonują się jako zmiany pulsacyjne i wolniejsze, ale o znacznie większej amplitudzie, zmiany wywoływane nierównomierną w czasie dostawą zwietrzelin do wód rzecznych. Oba typy zmian są bardziej dynamiczne od zmian przepływu wody.

Przegląd bogatej literatury charakteryzującej mechanizm i dynamikę transportu zawiesiny w rzekach górskich[1], pozwala wyróżnić następujące cechy tego transportu, które powinny być uwzględniane w metodyce pomiarowej:

— Mechanizm pulsacyjnych zmian zmącenia nie został dokładnie poznany i jest tłumaczony turbulentnym ruchem wody lub różną bezwładnością płynącej wody oraz zawiesiny.

— Wzrost zmącenia wody powoduje zwiększenie szybkości jej spływu, w wyniku czego wzrasta zdolność rzek do transportu grubszych frakcji.

— Unoszenie cząstek zawiesiny wyjaśnia teoria turbulencji. Mechanizm unoszenia cząstek jest tłumaczony na gruncie teorii dyfuzyjnego lub grawitacyjnego ruchu cząstek. W warunkach naturalnych zdolność unoszenia cząstek zawiesiny (o nieregularnych kształtach) jest większa niż to wynika z rozważań teoretycznych.

— W wyniku transformacji opadu w odpływ, w zlewni zaznaczają się gwałtowne zmiany zmącenia cieków. Najbardziej dynamiczne zmiany zmącenia stwierdza się podczas wzrostu przepływów wezbraniowych, przy czym amplituda wzrostu zmącenia wielokrotnie przekracza wielkość wzrostu przepływu.

— Maksymalne zmącenie rzek na ogół wyprzedza kulminacyjny przepływ wezbraniowy. Wyprzedzenie to stwierdzane w rzekach wszystkich stref morfoklimatycznych osiąga zróżnicowaną wartość, zależną od wielkości rzeki,

---

[1] Obszerny przegląd literatury przedmiotu zamieszczony jest w pracy doktorskiej A. Łajczaka pt. *Zróżnicowanie transportu zawiesiny w karpackiej części dorzecza Wisły*. Praca ta znajduje się w Bibliotece Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN w Warszawie.

http://rcin.org.pl

dostawy zwietrzelin ze strefy przykorytowej, natężenia ruchu rumowiska, przepływu rzeki.

— Zależność między zmąceniem i przepływem rzek podczas wezbrań ma charakter pętlicowy, zmienny wzdłuż biegu rzeki oraz w czasie. Kształty hydrogramów przepływu i zmącenia są zbliżone oraz przesunięte względem siebie.

— Zmącenie rzek w następujących po sobie wezbraniach jest coraz mniejsze. Wydłużenie czasu między kolejnymi wezbraniami znajduje odzwierciedlenie we wzroście zmącenia rzek podczas wezbrań.

— Intensywna dostawa zwietrzelin z erodowanego koryta rzeki zaznacza się zwłaszcza podczas katastrofalnych wezbrań, kiedy zachodzi dopasowywanie morfologii koryta do ekstremalnych przepływów. W takich warunkach kulminacje przepływu i zmącenia rzek występują równocześnie.

— Koncentracja zawiesiny w przekroju poprzecznym koryta rzeki wzrasta na ogół w kierunku dna. Większe zmącenie w warstwie przydennej jest spowodowane unoszeniem grubszych frakcji. Największe zmącenia występują w strefie nurtu. Drobne cząstki zawiesiny są rozmieszczone w profilu poprzecznym cieku bardziej równomiernie niż cząstki grubsze.

— Urozmaicona rzeźba koryt rzecznych sprzyja bardziej wyrównanemu zmąceniu w poprzecznych przekrojach cieków.

Szybkie zmiany zmącenia rzek karpackich utrudniają obliczanie rzeczywistych mas transportu zawiesiny odpływającej w różnych interwałach czasowych. Pomiary zmącenia tych rzek są prowadzone z różną częstotliwością w niewielkiej liczbie punktów w przekrojach poprzecznych koryta lub tylko w jednym punkcie stałym. W tej sytuacji konieczna jest dokładna ocena metod pomiarowych (Froehlich 1982).

W praktyce Państwowej Służby Hydrologicznej — obok pomiarów wielopunktowych zmącenia wykonywanych od kilku do kilkunastu razy w roku przy różnych stanach wody, w możliwie szerokim zakresie ich wahań — prowadzi się pomiary tylko raz na dobę w stałym miejscu w nurcie. Burzliwy przepływ wody w rzekach karpackich podczas średnich i wysokich stanów wody pozwala jednak z dużym przybliżeniem obliczać masę transportu zawiesiny tylko na podstawie jednopunktowych pomiarów zmącenia. Przemawiają za tym wartości współczynnika korekcyjnego „k_1" bliskie jedności, a także wyniki szczegółowych badań terenowych (Froehlich 1975).

Pomiary zmącenia prowadzone ze zmienną częstotliwością pozwalają jedynie ustalić ogólny kształt fali odpływu zawiesiny. Masy transportu obliczane na podstawie tych pomiarów są obarczone błędem; w wieloleciu są zaniżone w stosunku do wielkości rzeczywistych, przy czym błąd jest tym większy im rzadziej są prowadzone pomiary. Źródło błędu tkwi, pomimo dobrej znajomości przepływu (limnigram), w nieznajomości:

— zmąceń maksymalnych wymykających się spod kontroli,

— krótkotrwałych zmian zmącenia, szczególnie podczas wzrostu przepływu (Łajczak 1989b).

http://rcin.org.pl

Zbyt mała częstotliwość pomiarów zmącenia w profilach kontrolnych IMGW (raz w ciągu doby) nie pozwala więc kontrolować rzeczywistych zmian zmącenia rzek (Froehlich 1975, 1982; Osuch 1978; Madeyski 1983). Zagęszczone pomiary zmącenia prowadzone tylko w posterunkach specjalnych co 3, a nawet co 1 godz. podczas wezbrań i raz na dobę w okresach międzywezbraniowych, dają już znacznie bardziej dokładny obraz zmian zmącenia.

Pobór wody batometrem o powolnym napełnianiu i dużej pojemności w dużym stopniu ogranicza wpływ zjawiska pulsacji. W efekcie pobrana próba wody ma uśrednione zmącenie, reprezentatywne w dłuższym przedziale czasu. Stosowane w Polsce batometry o powolnym napełnianiu i objętości 2 l pozwalają dokładnie obliczać zmącenie rzek podczas podwyższonych stanów wody (Brański 1967).

OCENA METOD POMIARÓW I OBLICZEŃ TRANSPORTU ZAWIESINY

Zasady pomiaru zmącenia i obliczania parametrów transportu zawiesiny w profilach pomiarowych IMGW szczegółowo określają obowiązujące instrukcje. Stosowana w Polsce metoda obliczeniowa wymaga znajomości zmąceń P i przepływu Q z każdego dnia z godz. 7^{00}. Brakujące wartości P oblicza się za pomocą interpolacji liniowej, a podczas wezbrań tzw. metodą „z analizy graficznej". Parametry transportu zawiesiny oblicza się metodą „normalną" oraz „uproszczoną". Druga z tych metod daje wartości transportu zawiesiny w rzekach karpackich nawet kilkakrotnie zaniżone w stosunku do wartości obliczanych metodą „normalną" (Gładki, Madeyski 1975) i dlatego nie może być brana pod uwagę w jakichkolwiek rozważaniach.

Wyniki najbardziej zbliżone do rzeczywistych uzyskuje się w przypadku zagęszczonych wielopunktowych pomiarów zmącenia (Froehlich 1975, 1982). Zastosowanie ciągłych pomiarów zmącenia, z wykorzystaniem metod nefelometrycznych lub kolorymetrycznych, jest w rzekach karpackich niemożliwe ze względu m.in. na szybką zmienność uziarnienia zawiesiny.

Stopień dokładności obliczanych parametrów transportu zawiesiny jest również uzależniony od długości okresu pomiarowego. Wyniki pomiarów zmącenia, wykonywanych batometrem o powolnym napełnianiu w ustalonych terminach obserwacji, są przypadkowo modyfikowane przez krótkotrwałe zmiany zmącenia, szczególnie podczas wzrostu przepływu wezbraniowego. Powstają więc błędy przypadkowe pomiarów, które można zmniejszyć, jeżeli brane są pod uwagę serie pomiarów z wielolecia, na podstawie których uzyskujemy wartości przeciętne. Zmniejszenie tych błędów jest tym bardziej efektywne, im dłuższy okres jest brany pod uwagę (Brański 1968a, b, 1975).

Przyjęcie odpowiednio długiego okresu pomiarów pozwala uzyskać wartości parametrów transportu zawiesiny, które w końcowym efekcie są obarczone tylko błędem wynikającym z nieznajomości P_{max} podczas wezbrań. Wpływ błędu S_k współczynnika korekcyjnego k_1 będzie w tej sytuacji minimalny (Brański 1975). Założony błąd maksymalny 20% w obliczeniach miesięcz-

http://rcin.org.pl

nych charakterystyk transportu zawiesiny, zmniejsza się przy obliczaniu charakterystyk rocznych, a szczególnie przy obliczaniu charakterystyk przeciętnych z długiego wielolecia (Brański 1967, 1968a, b). Wychodząc z założenia o konieczności brania pod uwagę odpowiednio długiego ciągu danych pomiarowych w celu obliczenia wiarygodnych przeciętnych charakterystyk transportu zawiesiny w rzekach karpackich uważam, że podstawowy okres pomiarowy w odniesieniu do tych rzek nie powinien wynosić minimum 5 lat (Brański 1975), lecz być zbieżny z wyróżnionym przez J. Stachy'ego (1984) trzydziestoletnim cyklem odpływu rzek polskich. W przypadku rzek karpackich należy jednak brać pod uwagę ekscesywnie wzmożony transport zawiesiny w rzekach, zdarzający się raz na kilkadziesiąt lub nawet raz na sto kilkadziesiąt lat (Maruszczak 1984b; Łajczak 1989b).

Dokładność obliczanych parametrów transportu zawiesiny według założeń metody obowiązującej w IMGW jest zbliżona we wszystkich posterunkach pomiaru zmącenia. Parametry te są zaniżone w stosunku do wartości rzeczywistych. Stosowanie ujednoliconej metody pomiarowej i obliczeniowej powoduje, że stopień zaniżenia rzeczywistych wartości transportu jest proporcjonalny do wielkości transportu. Dlatego można przyjąć, że parametry obliczane tą metodą wyrażają jedynie względne zróżnicowanie rzeczywistego transportu zawiesiny w rzekach.

Szybsze rzeczywiste tempo zamulania zbiorników zaporowych w polskich Karpatach, w stosunku do wartości prognozowanych na podstawie obliczanej retencji zawiesiny (Cyberski 1969; Wiśniewski 1972; Łajczak 1986), stanowi potwierdzenie zaniżonej wielkości miar transportu zawiesiny w rzekach karpackich, obliczanych według metody obowiązującej.

Niewielka dokładność tej metody jest również w dużym stopniu spowodowana przyjętym sposobem przeliczeń. Błędy popełniane w toku obliczeniowym powodowane są przez:

– nieprecyzyjne interpolowanie brakujących codziennych wartości zmącenia; dotyczy to zwłaszcza sposobu interpolacji „z analizy graficznej";

– sposób obliczeń średnich wartości unoszenia $\bar{U}$ i zmącenia $\bar{P}$, będących podstawą dalszych przeliczeń bilansowych.

OCENA WYNIKÓW W ŚWIETLE ZASTOSOWANEJ METODY OBLICZEŃ

Zastosowanie w pracy nowego sposobu obliczeń pozwoliło uzyskać przeciętne wartości parametrów transportu zawiesiny o większej dokładności. To zwiększenie dokładności końcowych rezultatów obliczeń wynika z zastosowania zaproponowanych sposobów interpolacji brakujących wartości zmącenia i innego niż dotychczas sposobu obliczania średnich wartości zmącenia $\bar{P}$ i unoszenia $\bar{U}$ w przedziałach czasu: miesiące, lata. Zaproponowany sposób obliczeń nawiązuje do mechanizmu procesów transportu zawiesiny.

Parametry transportu zawiesiny obliczono także według założeń obowiązującej metody obliczeniowej. W obu przypadkach wykonano obliczenia na

http://rcin.org.pl

podstawie tych samych danych wyjściowych, jakimi są wyniki codziennych pomiarów zmącenia i przepływu Państwowej Służby Hydrologicznej z lat 1961–1980 z 30 posterunków pomiaru zmącenia zlokalizowanych na 16 karpackich dopływach Wisły (por. ryc. 1). Zastosowanie różnych sposobów obliczeń powoduje, że końcowe wyniki ustaleń, pomimo tych samych danych wyjściowych, znacznie się różnią. Parametry transportu zawiesiny, obliczone zgodnie z obowiązującą instrukcją, ustalono na podstawie codziennych danych pomiarowych z tego samego wielolecia, także dla pozostałych posterunków kontroli zmącenia IMGW w dorzeczu górnej Wisły. Na tej podstawie uzyskano informacje o roli dopływów karpackich w zasilaniu górnej Wisły w zawiesinę.

Proponowana metoda obliczeń parametrów transportu zawiesiny wymaga znajomości codziennych wartości zmącenia P i przepływu Q z godz. 7^{00}. Brakujące wartości zmącenia uzupełniono jedną z następujących przetestowanych arytmetycznych metod interpolacji:

– interpolacja liniowa w każdej sytuacji hydrologicznej;

– interpolacja proporcjonalna do zmian przepływu w każdej sytuacji hydrologicznej;

– interpolacja liniowa w okresach międzywezbraniowych i interpolacja proporcjonalna do zmian przepływu podczas wezbrań;

– interpolacja proporcjonalna do zmian przepływu w okresach międzywezbraniowych i interpolacja liniowa podczas wezbrań;

– interpolacja liniowa podczas wzrostu przepływu i interpolacja proporcjonalna do zmian przepływu podczas zmniejszania się przepływu;

– interpolacja proporcjonalna do zmian przepływu podczas wzrostu przepływu i interpolacja liniowa podczas zmniejszania się przepływu.

Zastosowanie wymienionych metod interpolacji wymagało uprzedniego wyróżnienia w hydrogramach codziennych przepływów 4 wskazanych sytuacji hydrologicznych. Podziału tego dokonano w hydrogramach z wszystkich badanych profilów pomiarowych z lat 1961–1980.

Analiza danych pomiarowych z siedmiu profilów mających codzienne zmierzone wartości zmącenia w analizowanym wieloleciu (Skoczów, Żywiec, Proszówki, Jakubkowice, Nowy Sącz, Rożnów, Czchów) pozwoliła wybrać – metodą symulacji – sposób interpolacji brakujących codziennych wartości zmącenia, w wyniku którego można uzyskać przeciętne z wielolecia wartości parametrów transportu zawiesiny obarczone minimalnym błędem w stosunku do wartości obliczonych na podstawie codziennych zmierzonych zmąceń. Minimalny błąd o wartości kilku procent (w przewadze o znaku +) wynika najczęściej z zastosowania drugiego z wyżej wymienionych sposobów interpolacji brakujących codziennych wartości zmącenia. Jest to jednocześnie najbardziej czasochłonny sposób interpolacji. Ten sposób interpolacji został wykorzystany w celu uzupełnienia ciągów danych z pozostałych profilów pomiarowych, mających luki w obserwacjach, które trwają najczęściej do kilku dni w okresach międzywezbraniowych. Podczas wezbrań, zwłaszcza większych.

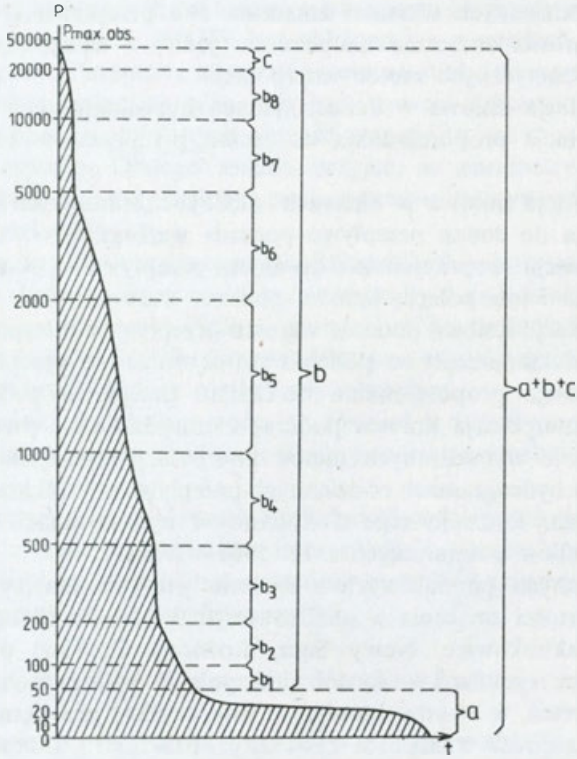
http://rcin.org.pl

zmącenie we wszystkich posterunkach pomiarowych jest na ogół mierzone codziennie.

Uzupełnione ciągi codziennych wartości zmącenia P w $g \cdot m^{-3}$, z godz. 7^{00}, a także znane z tych terminów obserwacji przepływy Q w $m^3 \cdot s^{-1}$, stanowiły podstawę obliczenia ciągów codziennych wartości unoszenia U w $kg \cdot s^{-1}$:

$$U = 10^{-3} \cdot P \cdot Q.$$

Analiza transportu zawiesiny wymaga znajomości parametrów transportu w kolejnych miesiącach i latach w badanym wieloleciu 1961 – 1980. Do obliczenia tych parametrów potrzebne są ciągi codziennych wartości zmącenia i unoszenia. Podstawę tych obliczeń stanowią wykreślone w układzie kartez-



Ryc. 2. Schemat konstrukcji krzywej czasu trwania zmącenia (P) w badanych przedziałach czasu oraz zasada obliczania powierzchni zawartej między krzywą czasu trwania a osiami współrzędnych

a – powierzchnia obliczona metodą planimetrowania; b, c – powierzchnie obliczone arytmetycznie; a + b + c – całkowita powierzchnia zawarta między krzywą czasu trwania a osiami współrzędnych; $b_1, \ldots b_n$ (kolejne trapezy) i c (trójkąt końcowy) – wyznaczone przez granice skokowej zmiany wyskalowania osi pionowych

Scheme of design of duration curves of turbidity (P) in the studied time intervals and a method of calculation of the area between a given duration curve and coordinate axes

a – the area is determined using planimeter; b, c – areas are determined by calculation; a + b + c – total area between duration curves and coordinate axes; $b_1, \ldots, b_8$ (succesive trapeziods) and c (the closing trangle) – indicate changes in the vertical axis scale

http://rcin.org.pl

jańskim krzywe czasu trwania zmącenia i unoszenia w wymienionych przedziałach czasu we wszystkich analizowanych profilach pomiarowych. Krzywe te wykreślono bazując na wąskich przedziałach częstotliwości. Rycina 2 przedstawia schematyczną krzywą czasu trwania zmącenia P a także zasadę obliczania powierzchni zawartej między tą krzywą a osiami układu współrzędnych. Przyjęto zasadę indywidualnego doboru przedziałów częstotliwości zmącenia w każdym z badanych przedziałów czasowych i w poszczególnych profilach kontrolnych. W ten sam sposób postąpiono w przypadku konstrukcji krzywych czasu trwania unoszenia U. Powierzchnia zawarta między odpowiednią krzywą czasu trwania a osiami układu współrzędnych i podzielona przez podstawę pozwala dokładnie obliczyć wartość średnią $\bar{P}$ i $\bar{U}$ w badanym przedziale czasu.

Obliczone w ten sposób średnie wartości zmącenia i unoszenia reprezentują wartości w nurcie rzeki, dlatego w dalszych obliczeniach muszą być przeliczone na wielkości reprezentujące zmącenie w całym przekroju poprzecznym rzeki. W tym celu wielkości obliczone z krzywych czasu trwania oznaczono następująco: $\bar{P}'$ i $\bar{U}'$.

Średnie wielkości unoszenia $\bar{U}'$ stanowią podstawę obliczenia masy transportu zawiesiny R w tonach:

– w roku przeciętnym i w miesiącach przeciętnych w wieloleciu

$$\bar{R} = 10^{-3} \cdot \bar{k}_1 \cdot \bar{U}' \cdot T;$$

– w kolejnych zaś latach

$$R = 10^{-3} \cdot k_1 \cdot \bar{U}' \cdot T;$$

gdzie: k_1 – wartość współczynnika korekcyjnego w danym roku, pozwalająca przejść od wyników pomiarów jednopunktowych zmącenia w profilu pomiarowym do wyniku zmącenia średniego w całym profilu; $\bar{k}_1$ – średnia ważona wartość współczynnika w wieloleciu 1961 – 1980; $\bar{U}'$ – średnia w badanym przedziale czasowym wartość unoszenia uzyskana z pomiarów jednopunktowych zmącenia w profilach kontrolnych; T – okres wyrażony w s; 10^{-3} – przelicznik z kg na tony.

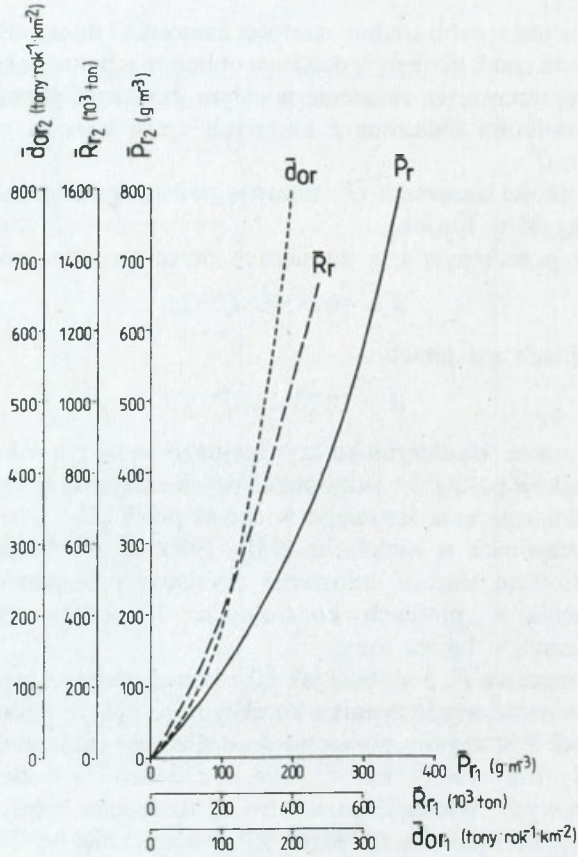
Wielkość zmącenia $\bar{P}'$, podobnie jak $\bar{U}'$, również uległa skorygowaniu przez odpowiednią wartość współczynnika korekcyjnego k_1. Obliczone w powyższy sposób wartości R stanowiły podstawę do obliczenia jednostkowej denudacji odpływowej d_o (tony · rok^{-1} · km^{-2}, tony · m-c^{-1} · km^{-2}) w zlewniach pierwszych i różnicowych. Wielkość parametru d_o to różnica odpływu i dopływu zawiesiny ze zlewni, podzielona przez jej powierzchnię.

Obliczone zgodnie z zasadami zaproponowanej metody wielkości parametrów transportu zawiesiny P, U, R, d_o są, pomimo brania pod uwagę tych samych danych wyjściowych, przeciętnie dwukrotnie większe (w niektórych przypadkach nawet czterokrotnie) od wartości obliczonych zgodnie z obowiązującymi zasadami. Sam proces obliczeniowy, niezależnie od metody pomiaru, wpływa więc istotnie na wiarygodność końcowych ustaleń w transporcie

http://rcin.org.pl

zawiesiny (Łajczak 1989b). Obliczone zaproponowaną metodą przeciętne wartości $\bar{P}$, $\bar{R}$ i $\bar{d}_o$ transportu zawiesiny z wielolecia 1961 – 1980 należy uznać za bliższe wartościom rzeczywistym, aniżeli wartości dotąd ustalane. Jednocześnie wielkości te ściślej korelują z parametrami fizycznogeograficznymi zlewni i parametrami rzek.

Stosowane w Polsce techniki pomiarowe i obliczeniowe transportu zawiesiny dają końcowe rezultaty ustaleń bardzo różniące się. Pod względem dokładności przeciętnych wielkości parametrów transportu z danych wieloletnich można je zaszeregować następująco:



Ryc. 3. Zależności między przeciętnymi rocznymi wartościami parametrów transportu zawiesiny z wielolecia 1961 – 1980, obliczonymi według założeń obowiązującej ($\bar{P}_{r1}$, $\bar{R}_{r1}$, $\bar{d}_{or1}$) i zaproponowanej ($\bar{P}_{r2}$, $\bar{R}_{r2}$, $\bar{d}_{or2}$) metody obliczeniowej

Relations between the mean annual (1961 – 1980) values of parameters of suspended material transportation calculated according to the accepted method ($\bar{P}_{r1}$, R_{r1}, $\bar{d}_{or1}$) and according to the proposed method ($\bar{P}_{r2}$, $\bar{R}_{r2}$, $\bar{d}_{or2}$)

http://rcin.org.pl

– „uproszczona" metoda obliczeniowa (najmniej dokładna),
– „normalna" metoda obliczeniowa,
– zaproponowana metoda obliczeniowa,

} metody oparte na wynikach pomiarów Państwowej Służby Hydrologicznej

– metody oparte na zagęszczonych pomiarach zmącenia,
– metody oparte na ciągłych pomiarach zmącenia (najdokładniejsze).

Zastosowanie wymienionych metod pozwala uzyskać parametry transportu zawiesiny o coraz większej wartości. Pomimo brania pod uwagę tych samych danych wyjściowych najniższe wartości parametrów uzyskujemy w wyniku zastosowania metody „uproszczonej", a najwyższe przy ciągłych pomiarach zmącenia. Wymienione metody pozwalają więc uzyskać wartości transportu zawiesiny w coraz większym stopniu zbliżone do wielkości faktycznych. Rycina 3 przedstawia zależności między przeciętnymi wielkościami transportu zawiesiny z wielolecia 1961 – 1980 obliczonymi według założeń zaproponowanej i tzw. „normalnej" metody obliczeniowej.

Statystyczna analiza uzyskanych wielkości transportu zawiesiny wymaga obliczenia współczynnika zmienności C_v:

– wieloletniej C_{v1} (zmienność rocznych wielkości R, $\bar{P}$, d_o, $\bar{Q}$ w wieloleciu);
– sezonowej C_{v2} (zmienność przeciętnych miesięcznych wielkości $\bar{R}$, $\bar{P}$, $\bar{d}_o$, $\bar{Q}$ w przeciętnym z wielolecia roku hydrologicznym).

PARAMETRY TRANSPORTU

Obliczono i scharakteryzowano wiele parametrów transportu zawiesiny z danych wieloletnich 1961 – 1980, które określają wielkość i natężenie tego transportu w posterunkach pomiarowych oraz w wyznaczonych przez nie zlewniach. Parametry te obliczono dwoma metodami, obowiązującą w IMGW i zaproponowaną przez autora. W obu sytuacjach oparto się na tych samych danych wyjściowych, jakimi są wyniki codziennych pomiarów zmącenia P i przepływu Q. Wyszczególnienie tych parametrów zawiera tabela 2.

Wartość odpływu zawiesiny ze zlewni ΔR obliczona w zlewniach pierwszych wyznaczonych przez najwyżej położony na rzece profil pomiarowy, jest równoznaczna z przepływem zawiesiny przez ten profil. W zlewniach różnicowych wyznaczonych przez kolejne dwa posterunki pomiarowe na rzece wartość ΔR powstaje przez odjęcie wartości R w profilu otwierającym zlewnię od wartości R w profilu zamykającym (dolnym). Wartość ta informuje o odpływie netto zawiesiny ze zlewni.

Średnie roczne i średnie miesięczne z wielolecia 1961 – 1980 wartości parametrów transportu zawiesiny, obliczone według założeń zaproponowanej metody, przedstawiają tabele 3 i 4. Zrezygnowano natomiast z zaprezentowania wartości transportu w kolejnych latach analizowanego wielolecia, a także z wartości obliczonych według założeń metody obowiązującej.

http://rcin.org.pl

Tabela 2

Parametry transportu zawiesiny obliczone na podstawie danych pomiarowych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej z wielolecia 1961 – 1980

Parametry transportu zawiesiny		Wielkości obliczone na podstawie: metody obowiązującej w IMGW	Wielkości obliczone na podstawie: metody zaproponowanej
Zmącenie w profilu pomiarowym $g \cdot m^{-3}$	średnie miesięczne w wieloleciu	$\bar{P}_{m1}$	$\bar{P}_{m2}$
	średnie roczne w kolejnych latach	$\bar{P}_{r1}$	$\bar{P}_{r2}$
	przeciętne roczne w wieloleciu	$\bar{P}_{r1}$	$\bar{P}_{r2}$
Przepływ zawiesiny przez profile pomiarowe (tony)	średni miesięczny w wieloleciu	$\bar{R}_{m1}$	$\bar{R}_{m2}$
	roczny w kolejnych latach	R_{r1}	R_{r2}
	przeciętny roczny w wieloleciu	$\bar{R}_{r1}$	$\bar{R}_{r2}$
Odpływ zawiesiny ze zlewni (tony)	średni miesięczny w wieloleciu	$\Delta\bar{R}_{m1}$	$\Delta\bar{R}_{m2}$
	roczny w kolejnych latach	ΔR_{r1}	ΔR_{r2}
	przeciętny roczny w wieloleciu	$\Delta\bar{R}_{r1}$	$\Delta\bar{R}_{r2}$
Jednostkowa denudacja odpływowa w zlewniach (tony · rok^{-1} · km^{-2}) (tony · m-c^{-1} · km^{-2})	średnia miesięczna w wieloleciu	$\bar{d}_{om1}$	$\bar{d}_{om2}$
	roczna w kolejnych latach	d_{or1}	d_{or2}
	przeciętna roczna w wieloleciu	$\bar{d}_{or1}$	$\bar{d}_{or2}$

PARAMETRY FIZYCZNOGEOGRAFICZNE ZLEWNI, PARAMETRY RZEK

W dotychczasowych opracowaniach parametry określające natężenie transportu zawiesiny w rzekach polskich Karpat korelowano z następującymi parametrami fizycznogeograficznymi zlewni: podatność erozyjna gleb, parametry określające użytkowanie ziemi, nachylenia, opady. Wymienione parametry stanowiły podstawę wykonanych przez A. Reniger (1959) i K. Dębskiego (1959) map potencjalnej erozji wodnej gleb w Polsce. Brak jednak opracowań analizujących wpływ poszczególnych parametrów zlewni na wielkość i intensywność transportu zawiesiny w rzekach karpackich. W niniejszej pracy problem ten próbowano rozwiązać na podstawie większej liczby parametrów zlewni. Biorąc pod uwagę propozycje zastosowania w analizie transportu zawiesiny innych parametrów zlewni i rzek, jak: natężenie spływu powierzchniowego (Sobczak 1965, 1966; Starkel 1980), zdolność transportowa rzeki (Brański 1968a, b), a zwłaszcza maksymalne wartości spływu powierzchniowego i opadów deszczu (Starkel 1980) oraz sugestie innych autorów (Painter 1976; Jansson 1982), obliczono na podstawie dostępnych materiałów wiele parametrów. Parametry te zaszeregowano do 3 grup nawiązujących do wodnego transportu produktów wietrzenia i erozji w zlewniach górskich:

– parametry decydujące o potencjalnych warunkach wodnej erozji gleb;

http://rcin.org.pl

Przeciętne roczne i miesięczne wartości zmącenia ($\bar{P}_2$ w $g \cdot m^{-3}$), masy transportu ($\bar{R}_2$ w tonach) i przepływu ($\bar{Q}$ w $m^3 \cdot s^{-1}$) z wielolecia 1961–1980 w posterunkach pomiarowych w karpackiej części dorzecza Wisły

Rzeka	Profil Pomiarowy	$\bar{P}_{r2}$			$\bar{P}_{m2}$												$\bar{R}_{r2}$			$\bar{R}_{m2}$										$\bar{Q}_r$			$\bar{Q}_m$										
		1961–1970	1971–1980	1961–1980	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	1961–1970	1971–1980	1961–1980	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	1961–1970	1971–1980	1961–1980	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Mała Wisła	Skoczów	61	93	77	45	53	48	48	83	53	59	101	219	101	53	50	13400	21300	17400	416	752	579	627	1890	1410	1010	2020	5640	1930	580	554	6,20	6,58	6,39	3,56	5,25	4,52	5,52	8,38	10,1	6,40	7,71	9,65	7,17	4,22	4,17
Mała Wisła	Goczałkowice	25	70	48	22	25	78	32	48	34	43	66	72	80	30	46	8040	23200	15600	247	354	1560	769	1400	1020	1090	2170	2580	2730	465	1140	9,49	9,59	9,54	4,31	6,89	7,54	9,85	10,8	11,6	9,33	12,7	13,5	12,8	6,02	9,13
Soła	Żywiec	321	358	340	31	44	58	124	248	44	286	1374	1308	469	54	31	192000	211000	202000	828	1610	1310	3790	13500	2890	11700	65300	76200	21500	1650	1040	15,6	15,6	15,6	10,4	13,7	8,39	12,4	20,4	25,4	15,3	18,3	21,8	17,2	11,7	12,4
Soła	Oświęcim	54	18	36	19	26	49	38	33	26	26	54	61	33	38	28	42300	11000	26700	615	1040	2150	1810	2520	2080	1820	4290	5360	2150	1610	1120	25,6	19,2	22,4	12,6	15,1	16,5	20,0	28,3	31,4	25,9	30,9	32,7	24,4	16,1	14,7
Skawa	Wadowice	371	395	383	31	100	84	292	369	176	375	1327	973	735	73	42	197000	219000	208000	658	3260	2350	9230	18800	9200	14700	69300	46900	30500	1610	1100	13,1	15,1	14,1	8,31	12,1	10,3	13,1	19,1	20,2	14,6	20,2	18,0	15,5	8,46	9,78
Czarna Orawa	Jabłonka[a]	169	–	–	54	20	12	50	215	76	91	148	634	500	12	120	13500	–	–	186	90	43	205	3050	783	512	950	4270	2860	40	485	2,05	2,26	2,16	1,33	1,65	1,34	1,71	3,65	3,96	2,09	2,46	2,51	2,14	1,27	1,50
Raba	Stróża	501	340	421	29	55	156	243	359	93	421	1088	1322	1080	46	152	193000	132000	163000	421	1140	2830	5430	13500	3820	11500	39800	48300	32700	756	2760	10,0	10,4	10,2	5,37	7,79	6,76	9,26	14,1	15,9	10,2	14,1	13,6	11,3	6,37	6,82
Raba	Proszówki	280	637	459	37	110	124	257	606	321	427	1152	1551	767	73	83	239000	452000	345000	972	3840	4560	11900	44600	22000	20300	77500	111000	43300	1900	2610	18,6	18,6	18,6	10,1	13,0	13,7	19,2	27,4	26,4	17,7	26,0	26,8	21,1	10,1	11,8
Łososina	Jakubkowice	553	378	466	70	89	210	389	843	780	224	792	932	1030	280	154	103000	80300	91700	577	929	1930	6480	16200	8370	3220	15900	17600	16200	2600	1260	5,43	4,85	5,14	3,15	3,89	3,44	5,49	7,15	6,72	5,37	7,80	7,05	5,82	2,76	3,02
Dunajec	Krościenko	247	277	262	24	37	18	26	194	241	155	595	980	770	52	50	358000	397000	378000	1160	1630	616	992	17100	33500	18900	83000	132000	81800	3160	3360	31,0	33,6	32,3	18,7	16,4	12,8	15,7	32,8	53,5	45,5	54,0	50,4	39,6	23,3	25,2
Dunajec	Nowy Sącz	327	197	262	55	55	29	52	320	309	212	823	749	422	63	55	930000	539000	735000	5430	5130	2140	4630	66400	90300	50600	224000	191000	81200	7100	7380	62,1	68,5	65,3	37,7	34,8	28,0	36,6	77,7	113.	89,4	105.	95,1	72,0	43,8	49,9
Dunajec	Rożnów	22	25	24	13	10	13	13	19	22	45	29	64	26	13	22	66000	86400	76200	1300	1080	1270	1190	6940	8980	13500	16000	16000	4270	1630	2940	62,8	76,4	69,6	43,2	44,3	47,6	40,0	77,5	105.	113.	120.	127.	75,6	46,5	77,5
Dunajec	Czchów	68	71	70	29	25	35	37	57	57	50	103	251	116	33	46	191000	211000	201000	2700	2370	3210	4390	12500	15800	14500	32700	78800	23800	3670	6900	69,6	75,8	72,7	37,6	37,1	35,4	47,9	84,3	107.	107.	122.	117.	77,1	44,6	55,6
Dunajec	Żabno	94	125	110	25	29	26	64	209	117	70	308	272	144	19	37	360000	424000	392000	3390	4350	3520	9350	56900	41300	22900	114000	93700	34400	2430	6080	85,3	90,7	87,5	53,0	55,6	50,5	60,5	102.	135.	121.	143.	129.	89,0	50,4	61,2
Poprad	Muszyna[a]	209	–	–	61	27	17	59	318	341	153	608	487	316	75	42	137000	–	–	238	6560	4890	8960	7860	5720	14800	28600	45500	7430	1730	5250	17,4	17,3	17,4	11,0	9,80	7,88	11,6	22,9	28,0	23,3	25,4	25,2	18,7	11,4	14,7
Poprad	Stary Sącz[b]	–	201	–	10	26	22	42	171	103	308	543	810	181	65	129	–	210000	–	407	1160	873	1580	13900	10100	26000	50600	80400	13100	3060	9230	25,1	25,7	25,4	16,5	14,6	11,9	17,4	34,2	42,0	34,8	38,0	37,7	28,0	16,9	22,1
Kamienica Nawojowska	Nowy Sącz[b]	–	256	–	18	54	44	28	354	384	69	744	535	509	151	182	–	42200	–	107	445	406	169	4270	5270	785	13200	8380	6540	1070	1600	3,34	4,01	3,68	2,14	2,48	1,99	3,02	4,87	5,68	4,07	6,23	6,28	4,59	2,31	2,66
Biała Tarnowska	Koszyce Wielkie	416	731	574	57	149	57	867	786	396	608	1412	1159	1091	109	184	152000	266000	209000	834	2640	907	22400	35600	14200	134000	48100	38200	28100	1170	2980	9,35	9,53	9,44	5,65	6,65	5,98	10,7	16,9	13,9	8,38	13,1	12,3	9,59	4,13	6,03
Ropa	Klęczany[b]	–	123	–	34	52	37	48	164	96	96	271	415	116	37	118	–	26600	–	452	821	461	615	3780	2090	1610	4940	8170	1710	344	1600	5,05	5,99	5,52	4,43	4,90	4,04	5,89	9,19	9,20	6,17	6,60	7,52	5,71	3,07	4,10
Wisłoka	Krajowice	380	396	388	109	132	70	307	532	275	411	838	954	598	85	349	318000	398000	358000	11900	6380	2420	18800	65800	31100	25300	64600	80100	34600	2280	14900	22,6	26,4	24,5	16,3	18,1	12,9	25,4	46,3	43,5	23,0	29,7	31,4	22,6	10,4	15,9
Wisłoka	Mielec	676	855	766	207	169	337	958	1639	980	751	1295	1463	1149	138	115	955000	1289000	1124000	13700	13100	18800	93600	294000	153000	66100	175000	178000	104000	6560	8170	35,1	40,3	37,7	25,7	29,1	20,9	40,4	67,2	60,2	32,9	52,0	45,5	33,9	18,4	26,4
Wisłok	Żarnowa	293	152	223	42	51	36	118	419	368	181	310	468	479	107	89	167000	101000	134000	1160	1570	831	4650	34100	25200	6380	13900	25100	16100	2140	2450	15,6	15,2	15,4	10,5	11,5	8,74	16,4	30,3	26,4	13,1	17,3	20,1	12,5	7,67	10,3
Wisłok	Tryńcza	417	316	567	147	180	158	301	712	554	415	488	635	609	110	99	584000	299000	442000	7340	11100	8350	31600	119000	82800	28400	47900	55900	40800	4060	4660	36,4	26,8	31,6	19,3	22,9	19,8	43,5	62,2	57,9	25,4	37,8	32,8	25,2	14,3	17,6
Solinka	Terka[b]	–	62	–	54	50	11	40	68	31	39	81	302	18	21	31	–	29700	–	996	2470	163	568	4930	3190	1160	2340	9330	253	3850	426	9,15	8,68	8,85	7,56	7,37	5,69	6,81	11,4	16,0	9,14	11,0	12,0	5,15	4,65	7,39
San	Zatwarnica[b]	–	28	–	8	4	2	4	15	8	5	98	152	24	7	6	–	13500	–	190	111	36	81	663	459	180	4230	6550	560	168	179	13,2	12,3	12,6	9,24	10,2	6,80	8,57	16,1	22,8	12,7	16,7	16,1	8,64	9,02	11,2
San	Lesko	28	25	27	15	10	11	19	43	59	29	41	44	27	15	15	30000	31200	30600	813	585	503	935	3670	7820	2820	4220	6510	1460	594	702	24,7	29,5	27,1	20,9	21,3	17,2	20,2	32,2	51,2	36,5	40,3	32,7	19,9	15,3	17,4
San	Dynów	657	921	789	316	521	331	513	939	1018	884	1373	1673	986	702	221	1135000	1500000	1318000	28200	50900	26200	43400	163000	226000	131000	236000	254000	91600	50200	17700	43,6	49,2	46,4	34,6	36,5	29,6	35,0	64,8	85,5	55,5	66,3	56,7	34,5	27,5	30,0
San	Jarosław[a]	323	–	–	152	45	36	297	785	795	210	578	465	354	126	48	1002000	–	–	23200	7610	4450	52300	219000	231000	51500	168000	157000	62700	15800	8660	72,4	82,2	77,3	55,1	57,2	50,2	71,3	122.	138.	84,6	103.	94,3	57,5	44,4	50,0
San	Radomyśl	257	201	229	71	87	39	103	506	449	215	442	433	277	73	53	1505000	1105000	1305000	19600	26300	10100	37400	323000	294000	82900	209000	188000	85400	15600	14600	144.	148.	146.	107.	112.	97,6	149.	238.	253.	144.	182.	163.	115.	83,0	103.
Wiar	Krówniki[b]	–	163	–	36	55	16	55	227	99	147	534	542	187	57	46	–	54100	–	409	781	184	725	5530	2230	2770	10600	27400	2260	595	659	7,91	7,08	7,37	4,36	5,36	4,20	5,49	9,11	8,72	7,03	9,45	17,2	4,52	3,98	5,41

[a] Dane za lata 1961–1970.
[b] Dane za lata 1971–1980.

http://rcin.org.pl

– parametry określające warunki dopływu zwietrzelin ze stoków do koryt rzecznych;

– parametry decydujące o odpływie zawiesiny w rzekach.

Podstawą takiego podziału parametrów jest założenie, że głównym obszarem zasilania rzek karpackich w zawiesinę (w skali wielolecia) są linijnie rozcinane stoki.

W pierwszej grupie parametrów obliczono: a) podatność erozyjną gleb PEG; b) użytkowanie ziemi: powierzchnię zajętą pod grunty orne GO, lasy L, łąki i pastwiska Ł, P, liczoną w km^2 lub w % powierzchni zlewni; c) współczynnik rozwinięcia powierzchni zalesionej w zlewni ε_1; d) współczynnik rozwinięcia powierzchni z gruntami ornymi w zlewni ε_2; e) stoczystość, czyli średnie nachylenie stoków w zlewni ψ w $^0/_{00}$; f) średni opad roczny $\bar{O}_r$ od 1961 r. do 1980 r., średni opad roczny $\bar{O}_r$ i miesięczny $\bar{O}_m$ (w mm) z wielolecia 1961 – 1980; g) średni maksymalny opad deszczu $\bar{O}_{rmax}$ od 1961 r. do 1980 r., średni maksymalny opad deszczu w roku $\bar{O}_{rmax}$ i w kolejnych miesiącach $\bar{O}_{mmax}$ w mm, z wielolecia 1961 – 1980; h) średni odpływ jednostkowy $\bar{q}$ od 1961 r. do 1980 r., średni roczny $\bar{q}_r$ i miesięczny $\bar{q}_m$ odpływ jednostkowy w $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$, z wielolecia 1961 – 1980; i) średni maksymalny odpływ jednostkowy $\bar{q}_{max}$ od 1961 r. do 1980 r., średni maksymalny odpływ jednostkowy w roku $\bar{q}_{rmax}$ i w kolejnych miesiącach $\bar{q}_{mmax}$ w $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$, z wielolecia 1961 – 1980. Parametry opisane w punktach od a) do e) to parametry statyczne, pozostałe zaś – dynamiczne.

Podatność erozyjną gleb (PEG) obliczono na podstawie instrukcji obowiązującej w Instytucie Upraw, Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach. Parametry określające użytkowanie ziemi, a także parametry ε_1 i ε_2 obliczono na podstawie dostępnych materiałów kartograficznych i statystycznych. Stoczystość zlewni ψ, z wyłączeniem płaskich den dolin i kotlin, obliczono metodą pomiaru długości poziomic na mapach w skali 1 : 100 000. Parametry określające opady i odpływ jednostkowy w badanych zlewniach obliczono metodą planimetrowania powierzchni między izoliniami badanych wielkości. Pomiarów tych dokonano na sporządzonych w tym celu mapach w skali 1 : 300 000 opartych na danych pomiarowych IMGW. Wykonane mapy średniego maksymalnego opadu deszczu wskazują obszary o największym natężeniu opadu deszczu w polskich Karpatach, informują również w przybliżeniu o przestrzennym zróżnicowaniu sum rocznych opadów ulewnych, niemożliwych do graficznej prezentacji z powodu braku odpowiednio gęstej sieci posterunków pluwiograficznych. Z kolei mapy średniego maksymalnego odpływu jednostkowego mogą wskazać obszary charakteryzujące się największym natężeniem jednostkowego odpływu powierzchniowego. Ta forma odpływu, stanowiąca prawie całą wartość przepływu rzek karpackich podczas kulminacyjnych przepływów wezbraniowych, jest odpowiedzialna za duże natężenie erozji gleby w zlewniach.

Drugą grupę może reprezentować parametr określający szerokość dna doliny.

http://rcin.org.pl

Trzecia grupa obejmuje następujące parametry rzek: a) średni przepływ $\bar{Q}$ od 1961 r. do 1980 r., średni przepływ roczny $\bar{Q}_r$ i miesięczny $\bar{Q}_m$ w $m^3 \cdot s^{-1}$, w profilach pomiarowych z wielolecia 1961 – 1980; b) średni maksymalny przepływ $\bar{Q}_{max}$ od 1961 r. do 1980 r., średni maksymalny przepływ roczny $\bar{Q}_{rmax}$ i miesięczny $\bar{Q}_{mmax}$ w $m^3 \cdot s^{-1}$, z wielolecia 1961 – 1980; c) średnie szybkości $\bar{v}$ w $m \cdot s^{-1}$ płynięcia wody w rzekach podczas charakterystycznych przepływów, z podziałem na wartości w nurcie $\bar{v}_{max}$ i w całym profilu poprzecznym rzeki $\bar{v}_{śr}$; d) spadki średniego zwierciadła wody w rzekach α w %; e) tempo erozji wgłębnej koryt rzecznych w profilach pomiarowych TEW w $mm \cdot rok^{-1}$.

Prędkość płynięcia wody w rzekach informuje o zdolnościach erozyjnych i transportowych rzek wzdłuż ich biegu. Tempo erozji wgłębnej oszacowano na podstawie szybkości obniżania się minimalnych rocznych stanów wody. Parametr TEW może informować o natężeniu dostawy materiału zawiesinowego pochodzącego z erozji koryt rzecznych.

Obliczone wielkości parametrów przedstawiono w postaci jednej liczby wyrażającej przeciętną wartość parametru na obszarze zlewni, w odcinku rzeki lub w profilu pomiarowym. Tak obliczone parametry mogą stanowić podstawę porównywania zlewni i rzek. Mogą również służyć do korelacji z natężeniem transportu zawiesiny w rzece, również określonym przez parametry wyrażające uśredniony obraz w zlewni. W niniejszej pracy zrezygnowano z tabelarycznej i graficznej prezentacji obliczonych parametrów zlewni oraz rzek.

KORELACJA PARAMETRÓW

Przeciętne wartości parametrów transportu zawiesiny, parametrów fizycznogeograficznych zlewni i parametrów rzek, zostały skorelowane według tabeli 5.

Tabela 5

Korelacja parametrów transportu zawiesiny z parametrami fizycznogeograficznymi zlewni i parametrami rzek

Parametry transportu zawiesiny	Parametry fizycznogeograficzne zlewni, parametry rzek	
	statyczne	dynamiczne
$\bar{P}_{r1}$, $\bar{P}_{r2}$	GO (%), PEG, ε_1, ε_2, ψ	$\bar{O}_r$, $\bar{O}_{rmax}$, $\bar{q}_r$, $\bar{q}_{rmax}$
$\bar{R}_{r1}$, $\bar{R}_{r2}$	———	$\bar{Q}_r$, $\bar{Q}_{rmax}$
$\Delta\bar{R}_{r1}$, $\Delta\bar{R}_{r2}$	A, GO (km^2)	———
$\bar{d}_{or1}$, $\bar{d}_{or2}$	GO (%), PEG, ε_1, ε_2, ψ	$\bar{O}_r$, $\bar{O}_{rmax}$, $\bar{q}_r$, $\bar{q}_{rmax}$

Zakres obliczeń objął ustalenie:

– współczynnika korelacji według momentu iloczynowego „r";
– równań regresji liniowej $y = ax + b$ i potęgowej $y = ax^b$, gdzie: y – wartość

http://rcin.org.pl

parametru transportu zawiesiny, x – wartość parametru fizycznogeograficznego zlewni i parametru rzeki, a i b – współczynniki;
– istotności korelacji.

Zaprezentowane poniżej zależności korelacyjne są statystycznie istotne nawet na wysokim poziomie 0,1%:

„y"	„x"	„r"	równanie regresji
$\bar{P}_{r1}$	GO (%)	0,6239	$y = 177{,}887\,x^{0{,}0303}$
$\bar{P}_{r1}$	ε_1	−0,5918	$y = 182{,}832\,x^{-0{,}2126}$
$\bar{P}_{r1}$	ε_2	0,5839	$y = 127{,}485\,x^{0{,}2091}$
$\bar{P}_{r2}$	GO (%)	0,8292	$y = 289{,}546\,x^{0{,}0432}$
$\bar{P}_{r2}$	ε_1	−0,6214	$y = 307{,}378\,x^{-0{,}3348}$
$\bar{P}_{r2}$	ε_2	0,7717	$y = 179{,}482\,x^{0{,}3013}$
$\bar{R}_{r1}$	$\bar{Q}_r$	0,7221	$y = 2495{,}82\,x + 176581$
$\bar{R}_{r1}$	$\bar{Q}_{r\max}$	0,7761	$y = 94015\,x^{0{,}0426}$
$\bar{R}_{r2}$	$\bar{Q}_r$	0,7334	$y = 203448\,x^{0{,}1422}$
$\bar{R}_{r2}$	$\bar{Q}_{r\max}$	0,7918	$y = 171749\,x^{0{,}0490}$
$\Delta\bar{R}_{r1}$	A	0,7539	$y = 38{,}3914\,x + 194331$
$\Delta\bar{R}_{r1}$	GO (km^2)	0,7725	$y = 71{,}1891\,x + 195657$
$\Delta\bar{R}_{r2}$	A	0,7915	$y = 15704\,x^{0{,}0249}$
$\Delta\bar{R}_{r2}$	GO (km^2)	0,8232	$y = 173066\,x^{0{,}0446}$
$\bar{d}_{or1}$	GO (%)	0,6423	$y = 7{,}46922\,x + 93{,}234$
$\bar{d}_{or1}$	ε_1	−0,6083	$y = -7{,}59099\,x + 85{,}62$
$\bar{d}_{or1}$	ε_2	0,6480	$y = 9{,}26795\,x + 93{,}7231$
$\bar{d}_{or2}$	GO (%)	0,7149	$y = 152{,}444\,x^{0{,}0192}$
$\bar{d}_{or2}$	ε_1	−0,6221	$y = 156{,}55\,x^{-0{,}1296}$
$\bar{d}_{or2}$	ε_2	0,7653	$y = 119{,}45\,x^{0{,}1823}$

Próba skorelowania parametrów transportu zawiesiny $\bar{P}_{r1}$, $\bar{P}_{r2}$, $\bar{d}_{or1}$, $\bar{d}_{or2}$ z parametrami zlewni: PEG, ψ, $\bar{O}_r$, $\bar{O}_{r\max}$, $\bar{q}_r$, $\bar{q}_{r\max}$ nie dała pozytywnych wyników. Współczynniki korelacji okazały się niższe od |0,5|, przy czym tylko niektóre z tych zależności są statystycznie istotne na niskim poziomie 5%. Dynamiczne parametry zlewni (opady, odpływ jednostkowy), choć nie wywierają znaczącego wpływu na wielkość denudacji zlewni karpackich i w efekcie na wielkość odpływu zawiesiny w rzekach, to jednak określają czasową zmienność tego transportu. Decydujący wpływ na wielkość i natężenie transportu zawiesiny w rzekach karpackich wywierają parametry określające użytkowanie ziemi w zlewniach: GO w km^2 lub % powierzchni zlewni, ε_1, ε_2.

http://rcin.org.pl

Podjęto także próbę skorelowania sezonowego przebiegu wartości wybranych parametrów transportu zawiesiny (P, R), z sezonowym przebiegiem wartości dynamicznych parametrów zlewni i rzek. Analogicznie postąpiono w przypadku wieloletniego przebiegu wartości tych parametrów. Przeprowadzona analiza pozwala wybrać parametry zlewni i rzek w największym stopniu wpływające na czasową zmienność natężenia transportu zawiesiny.

ZMIENNOŚĆ SEZONOWA

Ilorazy przeciętnych z wielolecia miesięcznych zmąceń $\bar{P}_m$ z kolejnych miesięcy i przeciętnych zmąceń rocznych $\bar{P}_r$ informują o względnej sezonowej zmienności zmącenia. Przebieg zmącenia jest uzależniony od opadów i odpływu jednostkowego. W przypadku wymienionych wcześniej parametrów charakteryzujących opady i odpływ jednostkowy w zlewniach, obliczono ilorazy wartości przeciętnych miesięcznych i przeciętnych rocznych. W celu otrzymania jednorodnych ilorazów analizowanych dalej wartości w przypadku parametrów $\bar{O}$ i $\bar{O}_{max}$ obliczono ilorazy: $\bar{O}_m/\frac{1}{12}\bar{O}_r$, $\bar{O}_{mmax}/\frac{1}{12}\bar{O}_{rmax}$. Przebieg wartości ilorazów w danym profilu pomiarowym pozwala wybrać parametr zlewni lub rzeki w największym stopniu kształtujący zmienność zmącenia. Wpływ parametru jest tym większy, im przebieg obu porównywanych wartości ilorazów jest bardziej zgodny. Można to wyrazić liczbowo metodą różnic przeciętnych RP. Znając bezwzględne wartości obliczonych różnic ilorazów (wartości bezwymiarowe) porównywanych dwóch parametrów w kolejnych miesiącach przeciętnego roku (12 różnic), obliczono następnie średnią z tych różnic

$$RP_{1;2} = \frac{\sum_{i=1}^{i=12} |a_{1x} - a_{2x}|}{12},$$

gdzie: $RP_{1;2}$ – różnica przeciętna między porównywanymi dwoma parametrami; a_{1x} – wartość ilorazu „x" z zespołu cech taksonomicznych parametru 1: a_{2x} – wartość ilorazu „x" z zespołu cech taksonomicznych parametru 2. W przypadku absolutnej zgodności przebiegu wartości ilorazów różnice są zerowe. Wpływ porównywanego parametru zlewni lub rzeki można uznać za dominujący. W rzeczywistości obliczone różnice przeciętne są zawsze większe od zera. Korelację przeprowadzono osobno dla parametrów $\bar{P}_{m1}$ i osobno dla parametrów $\bar{P}_{m2}$.

Analogicznie skorelowano sezonowy rytm przepływu zawiesiny przez profile pomiarowe, z sezonowym rytmem przepływu wody. W tym przypadku zanalizowano ilorazy: $\bar{R}_m/\frac{1}{12}\bar{R}_r$, $\bar{Q}_m/\bar{Q}_r$, $\bar{Q}_{mmax}/\bar{Q}_{rmax}$. Korelację tę wykonano również osobno dla parametrów $\bar{R}_{m1}$ i osobno dla parametrów $\bar{R}_{m2}$.

http://rcin.org.pl

Tabela 6

Różnice przeciętne (*RP*) między względnym sezonowym i wieloletnim przebiegiem zmącenia (P_2) i masy transportu (R_2) a przebiegiem wybranych parametrów hydrometeorologicznych

Rzeka	Posterunek pomiarowy	Zmienność sezonowa						Zmienność wieloletnia					
		P_2				R_2		P_2				R_2	
		O	O_{max}	q	q_{max}	Q	Q_{max}	O	O_{max}	q	q_{max}	Q	Q_{max}
Mała Wisła	Skoczów	0,26	0,36	0,29	0,21	0,46	0,34	0,57	0,53	0,52	0,44	0,56	0,45
Mała Wisła	Goczałkowice	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,67
Soła	Żywiec	0,79	0,69	0,93	0,63	1,00	0,69	0,59	0,58	0,58	0,43	0,60	0,47
Soła	Oświęcim	0,29	0,36	0,00	0,00	0,29	0,18	0,72	0,66	0,00	0,00	0,78	0,74
Skawa	Wadowice	0,56	0,52	0,69	0,49	0,78	0,57	0,57	0,54	0,59	0,54	0,58	0,53
Czarna Orawa	Jabłonka	0,80	0,69	0,73	0,66	0,86	0,73	0,67	0,64	0,59	0,59	0,61	0,59
Raba	Stróża	0,56	0,51	0,74	0,44	0,84	0,54	0,65	0,62	0,57	0,46	0,58	0,47
Raba	Proszówki	0,55	0,50	0,60	0,34	0,69	0,49	0,62	0,62	0,57	0,53	0,60	0,55
Łososina	Jakubkowice	0,48	0,48	0,39	0,39	0,54	0,41	0,67	0,66	0,64	0,61	0,77	0,78
Dunajec	Krościenko	0,71	0,60	0,75	0,43	0,83	0,51	0,40	0,41	0,38	0,35	0,46	0,39
Dunajec	Nowy Sącz	0,60	0,44	0,57	0,27	0,65	0,40	0,50	0,49	0,46	0,43	0,60	0,54
Dunajec	Rożnów	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64	0,48
Dunajec	Czchów	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,50
Dunajec	Żabno	0,56	0,46	0,70	0,32	0,64	0,47	0,36	0,39	0,38	0,42	0,36	0,36
Poprad	Muszyna	—	—	0,50	0,36	0,61	0,46	—	—	0,49	0,42	0,55	0,50
Poprad	Stary Sącz	0,61	0,55	0,67	0,57	0,78	0,66	0,00	0,00	0,48	0,42	0,54	0,50
Kamienica Nawojowska	Nowy Sącz	0,53	0,40	0,45	0,36	0,60	0,40	0,53	0,56	0,53	0,60	0,58	0,63
Biała Tarnowska	Koszyce Wielkie	0,52	0,48	0,53	0,21	0,54	0,33	0,41	0,42	0,38	0,45	0,40	0,42
Ropa	Klęczany	0,51	0,52	0,57	0,38	0,61	0,41	0,38	0,37	0,38	0,34	0,46	0,39
Wisłoka	Krajowice	0,37	0,42	0,53	0,29	0,49	0,36	0,37	0,38	0,37	0,41	0,45	0,43
Wisłoka	Mielec	0,48	0,51	0,37	0,23	0,46	0,40	0,26	0,29	0,27	0,30	0,30	0,28
Wisłok	Żarnowa	0,48	0,44	0,40	0,36	0,44	0,44	0,46	0,45	0,43	0,39	0,46	0,43
Wisłok	Tryńcza	0,38	0,45	0,33	0,28	0,42	0,23	0,47	0,48	0,39	0,40	0,50	0,45
Solinka	Terka	0,58	0,65	0,64	0,56	0,73	0,54	0,46	0,45	0,48	0,38	0,46	0,42
San	Zatwarnica	0,96	0,96	1,08	1,00	1,16	1,00	0,46	0,41	0,44	0,39	0,46	0,48
San	Lesko	0,38	0,41	0,00	0,00	0,48	0,58	0,44	0,45	0,00	0,00	0,49	0,48
San	Dynów	0,25	0,37	0,35	0,36	0,36	0,39	0,87	0,88	0,91	0,89	0,89	0,88
San	Jarosław	0,63	0,63	0,41	0,28	0,56	0,49	0,28	0,32	0,30	0,32	0,34	0,32
San	Radomyśl	0,48	0,47	0,41	0,32	0,59	0,48	0,43	0,45	0,39	0,41	0,45	0,39
Wiar	Krówniki	0,58	0,53	0,56	0,45	0,86	0,70	0,50	0,50	0,48	0,43	0,64	0,64

Objaśnienia: O — suma opadów; O_{max} — maksymalne dobowe sumy opadu deszczu; q — odpływ jednostkowy; q_{max} — maksymalny odpływ jednostkowy; Q — przepływ; Q_{max} — średni maksymalny przepływ; obliczone wielkości *RP* odnoszą się do posterunków pomiaru zmącenia; wartości 0,00 oznaczają, że w przypadku posterunków zlokalizowanych bezpośrednio poniżej zapór wodnych wartość RP nie była możliwa do określenia.

http://rcin.org.pl

W tym przypadku zanalizowano ilorazy wartości parametrów z kolejnych lat 1961,..., 1980 i wartości przeciętnej parametrów z wielolecia 1961 – 1980. Obliczenia wykonano osobno w przypadku parametrów $\bar{P}_{r1}$ i $\bar{R}_{r1}$ oraz osobno w przypadku parametrów $\bar{P}_{r2}$ i $\bar{R}_{r2}$. Różnice przeciętne RP obliczono następująco:

$$RP_{1;2} = \frac{\sum_{i=1}^{i=20} |a_{1x} - a_{2x}|}{20}.$$

Oznaczenia jak w przypadku poprzedniego wzoru. Obliczone wartości różnic przeciętnych RP zawiera tabela 6.

http://rcin.org.pl

HYDROMETEOROLOGICZNE CECHY OKRESU BADAŃ

Analiza danych pomiarowych z wielolecia 1961 – 1980 wymaga ustalenia reprezentatywności tego okresu pod względem warunków hydrometeorologicznych. W latach 1961 – 1980 średnie roczne wartości przepływu rzek były najczęściej większe od kilku do kilkunastu procent od wartości z lat 1951 – 1980 i 1921 – 1980. Największym odpływem cechowała się dekada 1971 – 1980, najmniejszym zaś 1951 – 1960. Potwierdza to wyniki J. Stachy'ego (1984), mówiące o wzroście w tym okresie o 10% odpływu rzek w Beskidach, a w pozostałej części analizowanego obszaru o 20%. Przyjęty w pracy okres pomiarowy przypada na końcową część lat posusznych i na lata mokre trzydziestoletniego cyklu odpływu rzek polskich. Ostatni pełny cykl zaznaczył się w latach 1951 – 1980.

Warunki hydroklimatyczne panujące w polskiej części Karpat decydują, że zdecydowana większość masy materiału zawiesinowego odpływa ze zlewni podczas krótkich epizodów wezbrań, zwłaszcza letnich – do 95% rocznego transportu (Froehlich 1975). W tym celu obliczono kilka parametrów charakteryzujących odpływ wezbraniowy rzek w polskich Karpatach w różnych okresach. W badanym dwudziestoleciu częstotliwość większych wezbrań letnich była większa, szczególnie zaznaczyło się to w górnej Wiśle i w karpackich dopływach do Dunajca włącznie (Punzet 1973, 1981). Jest to jedna z przyczyn wzrostu uwilgotnienia dekady 1971 – 1980 (Stachy 1984). W zachodniej części polskich Karpat (po Dunajec włącznie) duże wezbrania zdarzały się w ostatnich 120 latach średnio co 4,5 roku, w części wschodniej natomiast tylko co 6,1 roku. Wezbrania katastrofalne zdarzały się już co około 10 lat. W zachodnich karpackich dopływach Wisły kulminacyjne przepływy z lat 1961 – 1980 były na ogół mniejsze niż w latach wcześniejszych. W wielu posterunkach pomiarowych w dorzeczu Wisłoki, a szczególnie w dorzeczu Sanu, wartość Q_{max} wezbrania z lipca 1980 r. jest wartością najwyższą z dotychczas notowanych. Prawdopodobieństwo Q_{max} tego wezbrania zostało ustalone w tych rzekach odpowiednio na 6 i 3% (Stachy 1984). Tylko nieliczne wezbrania letnie obejmują jednocześnie całą karpacką część dorzecza Wisły. Najczęściej takimi wezbraniami objęte są zlewnie zachodnich dopływów, łącznie z górnymi częściami zlewni Wisłoki i Wisłoka (np. w latach 1973, 1970, 1960, 1958, 1934).

Przedstawione przez J. Punzeta (1975) średnie miesięczne wartości przepływu rzek karpackich z lat 1951 – 1970 są zbliżone do wartości z lat

http://rcin.org.pl

1961 – 1980. Sezonowy rozkład odpływu w analizowanym dwudziestoleciu można uznać za reprezentatywny w dłuższym wieloleciu.

Ustalenie miarodajnych wielkości przepływu rzek i transportu zawiesiny w karpackich dopływach Wisły wymaga przyjęcia danych z maksymalnie długiego okresu. Długość tego okresu limituje jednak termin rozpoczęcia pomiarów zmącenia rzek. Wymogowi temu odpowiada wielolecie 1951 – 1980. Przyjęty w opracowaniu okres pomiarowy 1961 – 1980 jest z konieczności krótszy, może jednak stanowić podstawę analizy odpływu wody i zawiesiny w rzekach polskich Karpat w ujęciu bilansowym. Przeciętne wartości transportu zawiesiny $\bar{R}$ obliczone z przyjętego wielolecia bardziej się różnią od takich wartości obliczonych z dłuższego wielolecia, aniżeli wartości przepływu Q. W hydroklimatycznych warunkach polskich Karpat zaznacza się bowiem ekscesywnie wzmożony transport zawiesiny, który w różnych rzekach zdarza się raz na kilkadziesiąt lub nawet raz na sto kilkadziesiąt lat (Maruszczak 1984b; Łajczak 1989b).

W dziewięciu analizowanych posterunkach pomiarowych zlokalizowanych na karpackich dopływach Wisły (30% z rozpatrywanych) pomiary zmącenia były prowadzone tylko w latach 1961 – 1970 lub 1971 – 1980. Istnieje zatem konieczność oceny reprezentatywności tych dziesięcioleci na tle wielolecia 1961 – 1980. Średnia roczna suma opadu w badanych zlewniach osiągnęła w dekadzie 1971 – 1980 100 – 107% średniej sumy z lat 1961 – 1980. W przypadku średnich maksymalnych sum opadu deszczu wartość ta osiągnęła 95 – 110%. Potwierdza to wyniki J. Stachy'ego (1984) dotyczące wzrostu sum opadu w ostatniej dekadzie. Następstwem wzrostu sum opadów jest zwiększenie do 10% średniego rocznego odpływu jednostkowego w zlewniach, z wyjątkiem wschodniej części obszaru. Wzrost średniego maksymalnego odpływu jednostkowego wyraźnie zaznaczył się tylko w zlewni Raby, Dunajca i Wisłoki, w pozostałych zlewniach stanowił w latach 1971 – 1980 tylko 50 – 100% wartości z lat 1961 – 1980. Średni roczny przepływ wody w większości posterunków pomiaru zmącenia wyniósł w ostatniej dekadzie 100 – 110% wartości z lat 1961 – 1980. W przypadku średniego maksymalnego przepływu wzrost zaznaczył się tylko w zlewni Dunajca i Wisłoki (do 12%), w pozostałych posterunkach pomiarowych osiągnął tylko 68 – 100% wartości z dwudziestolecia 1961 – 1980.

Dekadę 1971 – 1980 należy więc uznać za bardziej wilgotną od okresu 1961 – 1980, a więc od dekady 1961 – 1970. Wzrost natężenia ekstremalnych zjawisk hydrometeorologicznych nie objął jednak w skali wielolecia całego obszaru polskich Karpat. Należy zadać pytanie, czy przedstawione zmiany wielkości parametrów meteorologicznych i hydrologicznych rzek oraz zlewni wywołały odpowiednie zmiany wartości parametrów transportu zawiesiny.

Dekada 1971 – 1980 charakteryzowała się większym, nawet do 31%, odpływem zawiesiny z badanych zlewni. Zmniejszenie odpływu zawiesiny stwierdzono tylko w zlewni Wisłoka oraz lokalnie na zachodzie obszaru. Znacznie większe zmiany przepływu zawiesiny przez profile pomiarowe stwier-

http://rcin.org.pl

dzono tylko w odcinkach rzek poniżej zapór wodnych (zmiany w granicach ±50%). Zmiany w transporcie zawiesiny, wyrażone przez uśrednione wartości parametrów z obu dziesięcioleci, były na ogół zbieżne i jednocześnie znacznie większe od stwierdzonych zmian wielkości parametrów meteorologicznych i hydrologicznych. Przyczynę tego należy upatrywać w zwiększeniu częstotliwości wezbrań w zachodniej części karpackiego dorzecza Wisły w latach 1971–1980.

Przeciętne wartości parametrów transportu zawiesiny z lat 1961–1970 i 1971–1980 można uznać za zbliżone do wartości obliczonych z wielolecia 1961–1980. Przyjęcie w opracowaniu wyników obliczeń z 9 posterunków pomiarowych tylko z lat 1961–1970 lub 1971–1980 nie powinno prowadzić do błędnej interpretacji końcowych wyników.

http://rcin.org.pl

TRANSPORT ZAWIESINY W KARPACKIEJ CZĘŚCI DORZECZA WISŁY

TRANSPORT ZAWIESINY NA TLE WYBRANYCH OBSZARÓW

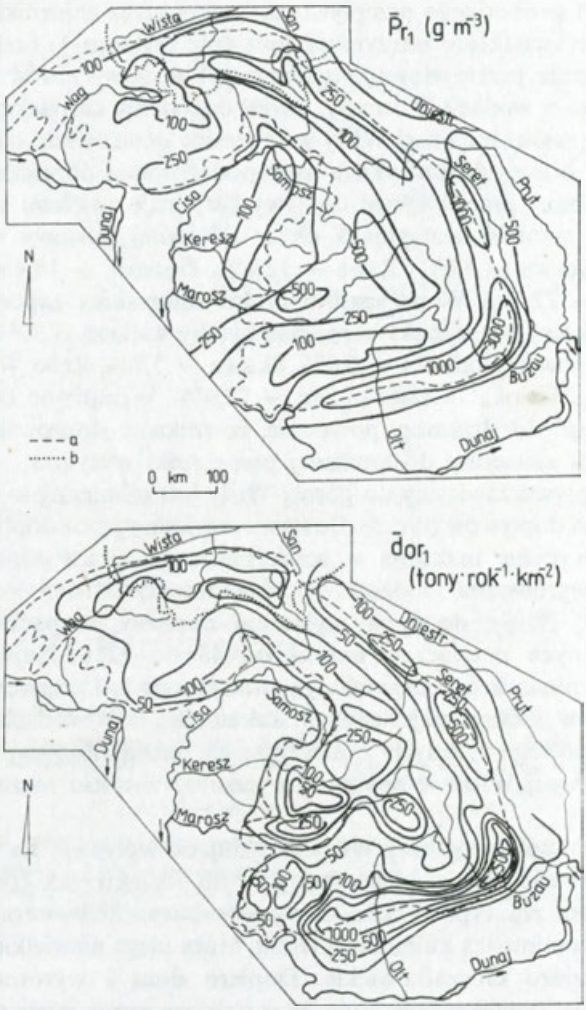
Zależność między denudacją odpływową a sumą opadów lub wielkością odpływu ma w skali globalnej złożony charakter (Shumm 1965; Rango 1970; Wilson 1973; Walling 1983). Największe nasilenie denudacji stwierdza się w obszarach o niewielkich i o wysokich sumach opadu (góry w strefach klimatu półsuchego, monsunowego, góry w strefach przyoceanicznych o umiarkowanym klimacie). Natężenie transportu zawiesiny w skali całego pasma Karpat jest 2 do 3 razy mniejsze niż w strefie śródziemnomorskiej, w Alpach i w Górach Skandynawskich i jest zbliżone do wartości przeciętnej globalnej (Strakhov 1967; Walling, Webb 1983). Jest ono jednak nawet o dwa rzędy wielkości mniejsze, aniżeli w najsilniej denudowanych obszarach w świecie.

Karpaty stanowią przykład pasma górskiego, gdzie wpływ różnych komponentów środowiska geograficznego i aktywności człowieka na natężenie transportu zawiesiny w rzekach jest możliwy do określenia. Przestrzenne zróżnicowanie litologii, energii rzeźby, mobilności sejsmicznej, natężenia ruchów masowych, warunków klimatycznych i hydrologicznych, użytkowania ziemi i zabudowy hydrotechnicznej rzek, znajduje odzwierciedlenie w skrajnie odmiennym natężeniu transportu zawiesiny w rzekach różnych regionów Karpat (Łajczak 1989a). Zróżnicowanie to ilustrują mapy denudacji odpływowej $\bar{d}_o$ w zlewniach i zmącenia $\bar{P}$ rzek (ryc. 4).

Karpacka część dorzecza Wisły charakteryzuje się, w porównaniu z pozostałą częścią Karpat, niewielkim natężeniem transportu zawiesiny. Denudacja odpływowa w zlewniach większych rzek jest średnio 4 razy mniejsza niż w całych Karpatach i aż 20 razy mniejsza niż w najsilniej denudowanej strefie Karpat – w Subkarpatach, gdzie natężenie denudacji odpływowej osiąga podobne wielkości jak w najsilniej denudowanych obszarach w Europie.

Denudacja odpływowa w zlewniach karpackiej części dorzecza Wisły jest natomiast przeciętnie o jeden rząd wielkości większa od denudacji w pozostałych regionach geomorfologicznych w Polsce (Brański 1975; Maruszczak 1984a).

http://rcin.org.pl



Ryc. 4. Izolinie przeciętnego rocznego zmącenia ($\bar{P}_{r1}$) rzek karpackich oraz przeciętnej wielkości denudacji odpływowej ($\bar{d}_{or1}$) z wielolecia 1951 – 1980

a – granica Karpat, b – granica dorzecza Wisły w Karpatach

Isolines of the mean annual turbidity ($\bar{P}_{r1}$) of the Carpathian rivers in the period 1951 – 1980 and of the average unit denudation due to runoff in catchements (d_{or1}), (tons · year^{-1} · km^{-2})

a – fringe of the Carpathians, b – border of the Vistula catchment in the Carpathians

ROLA KARPAT W DOSTAWIE ZAWIESINY DO GÓRNEJ WISŁY

Wśród wszystkich dopływów górnej Wisły dopływy karpackie są najwi sze zarówno pod względem łącznej powierzchni ich zlewni (70%), jak i p względem dopływu wody (80%); dostarczają także najwięcej zawiesiny (90%)

http://rcin.org.pl

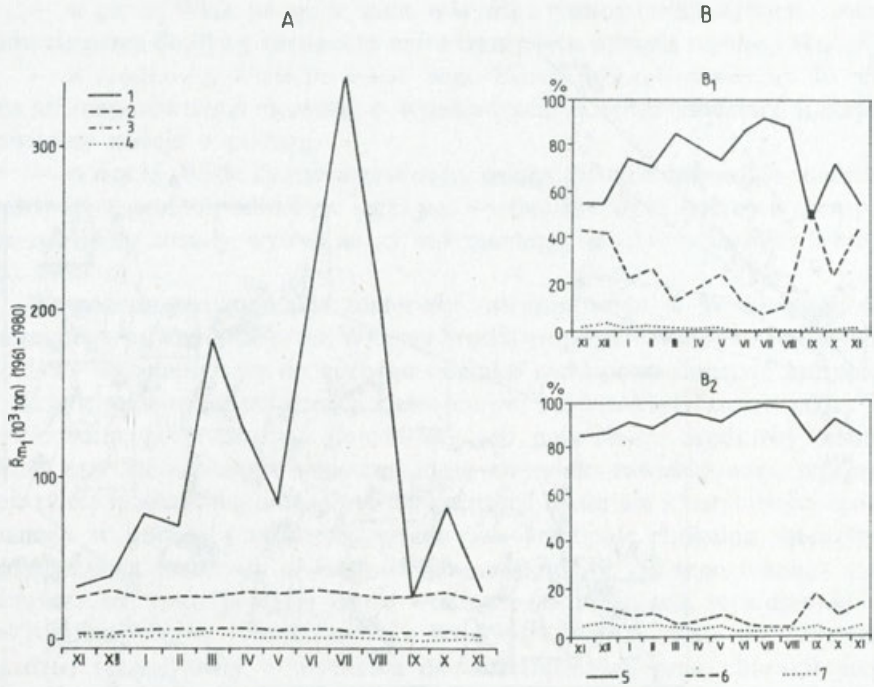
W warunkach swobodnego przepływu zawiesiny przez zbiorniki zaporowe na rzekach karpackich (które zatrzymują dużą ilość zawiesiny) i braku zanieczyszczeń pochodzenia przemysłowego (głównie pył węglowy z wód kopalnianych) i komunalnego w wodach Przemszy, udział dopływów karpackich, wyżynnych i nizinnych w zasilaniu górnej Wisły w zawiesinę oszacowano odpowiednio na 98,2 i 0%. W obecnych warunkach zagospodarowania dorzecza górnej Wisły dostawa zawiesiny przez większe dopływy karpackie zwiększa się w kierunku wschodnim i stanowi następującą część całkowitej dostawy z Karpat: Soła – 0,9%, Skawa – 7,6%, Raba – 12,4%, Dunajec – 19,4%, Wisłoka – 24,8%, San – 27,4%. W przypadku braku zbiorników zaporowych łączna dostawa zawiesiny przez rzeki karpackie byłaby większa o 30%, a ich udział wynosiłby odpowiednio: Soła – 5,8%, Skawa – 5,7%, Raba – 9,3%, Dunajec – 31,9%, Wisłoka – 18,6%, San – 22,9%. Wzmożone odprowadzanie pyłu węglowego do Przemszy powoduje, że rzeka ta doprowadza do górnej Wisły aż 58% zawiesiny dostarczanej przez rzeki wyżynne.

Reżim dopływu zawiesiny do górnej Wisły jest odmienny w wyróżnionych trzech grupach dopływów (ryc. 5). Dostawa zawiesiny przez dopływy karpackie wykazuje 4 wyraźne maksima w roku, natomiast przez dopływy wyżynne i nizinne jest wyrównana. O sezonowej zmienności całkowitej dostawy zawiesiny do górnej Wisły decydują wyłącznie dopływy karpackie; ich udział w poszczególnych miesiącach wynosi od 48 do 92%. Największy udział występuje w miesiącach o największym transporcie (od czerwca do sierpnia), a najmniejszy w miesiącach jesiennych. Zakładając, że w wodach Przemszy nie ma pyłu węglowego i innych zanieczyszczeń, udział dopływów karpackich w zasilaniu górnej Wisły w zawiesinę wynosiłby w cyklu rocznym od 82 do 98%.

Karpackie dopływy górnej Wisły decydująco wpływają na wielkość oraz czasową zmienność transportu zawiesiny w tym odcinku rzeki (ryc. 6). W Małej Wiśle zaznacza się typowy dla dopływów karpackich sezonowy rozkład transportu z dominującą kulminacją letnią, która ulega niewielkiemu złagodzeniu przez Jezioro Goczałkowickie. Dopiero duża i wyrównana dostawa zawiesiny przez Przemszę powoduje, że w dalszym biegu Wisły transport staje się bardziej wyrównany i tylko w niewielkim stopniu modyfikowany przez Sołę i Skawę. Dalszemu wyrównaniu transportu sprzyja zabudowa hydrotechniczna krakowskiego odcinka rzeki. Poniżej Krakowa transport zawiesiny w Wiśle określają już wyłącznie dopływy karpackie. Poniżej ujścia Raby aż do Annopola dominuje letnia kulminacja transportu, mimo wzrostu udziału wczesnowiosennej kulminacji roztopowej poniżej ujść Wisłoki i Sanu. Dopiero w Puławach obie kulminacje transportu równoważą się. Sezonowa zmienność transportu zawiesiny jest jednak w Wiśle mniejsza niż w dopływach karpackich, co pośrednio informuje o wzmożonej sedymentacji tego materiału w dolinie rzeki w miesiącach o największym transporcie, szczególnie latem.

Porównanie współczynnika zmienności wieloletniej C_{v1} i sezonowej C_{v2} transportu zawiesiny w dopływach karpackich, wyżynnych i nizinnych oraz

http://rcin.org.pl



Ryc. 5. Sezonowa zmienność dostawy zawiesiny do górnej Wisły

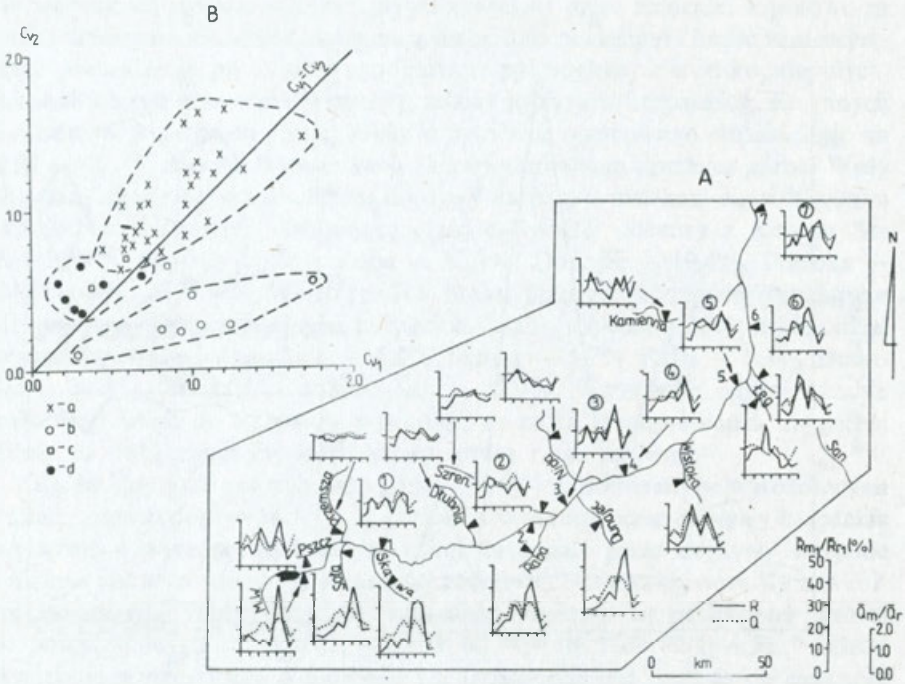
A – dostawa zawiesiny przez dopływy: 1 – karpackie, 2 – wyżynne (wariant z pyłem węglowym w wodach Przemszy), 3 – wyżynne (wariant bez pyłu węglowego w wodach Przemszy), 4 – nizinne; B – udział zasilania w zawiesinę przez dopływy: 5 – karpackie, 6 – wyżynne, 7 – nizinne; B_1 – sytuacja rzeczywista (duże ilości pyłu węglowego w wodach Przemszy); B_2 – wariant bez pyłu węglowego w wodach Przemszy

Seasonal variability of the suspended material supply to the upper Vistula

A by: 1 – Carpathian tributaries, 2 – upland tributaries (with coal dust in water of the Przemsza river), 3 – upland tributaries (without coal dust in water of the Przemsza river), 4 – lowland tributaries; B by: 5 – Carpathian tributaries, 6 – upland tributaries, 7 – lowland tributaries; B_1 – water of the Przemsza river with coal dust; B_2 – water of the Przemsza river without coal dust

w Wiśle wyraźnie wskazuje na dominującą rolę dopływów karpackich w kształtowaniu reżimu transportu w górnej i jeszcze w środkowej Wiśle. Wieloletnia i sezonowa zmienność transportu zawiesiny jest w Wiśle mniejsza niż w jej dopływach, z wyjątkiem Przemszy. W analizowanym odcinku Wisły zaznacza się wyraźnie wartość C_{v1} mniejsza od C_{v2}, szczególnie poniżej ujść Raby, Dunajca i Wisłoki. Ta cecha reżimu odpływu zawiesiny, typowa w badanym obszarze tylko w rzekach karpackich, wynika z dużej częstotliwości dostawy materiału zawiesinowego podczas wezbrań z Karpat głównie w miesiącach letnich. Poniżej Annopola transport zawiesiny w Wiśle ma już cechy reżimu rzeki niżowej z dominującą kulminacją roztopową. W wyniku ekscesywnie wzmożonego natężenia erozji i transportu zawiesiny w zlewniach karpackich ten typ reżimu transportu może się chwilowo zmienić, nawet w ujściowym odcinku Wisły. Zjawisko takie stwierdzono w dolnej Wiśle po

http://rcin.org.pl



Ryc. 6. Sezonowa i wieloletnia zmienność transportu zawiesiny w górnej i środkowej Wiśle oraz w jej dopływach

A – sezonowa zmienność transportu zawiesiny (R) na tle przepływu (Q) w posterunkach pomiarowych; B – zależność między współczynnikiem zmienności wieloletniej C_{v1} i sezonowej C_{v2} transportu zawiesiny w dopływach: a – karpackich, b – wyżynnych, c – nizinnych, d – w górnej i środkowej Wiśle; na poziomych osiach wykresów zaznaczono kolejne okresy dwumiesięczne roku hydrologicznego (XI–X); profile pomiaru zmącenia na Wiśle: 1 – Smolice, 2 – Sierosławice, 3 – Jagodniki, 4 – Szczucin, 5 – Sandomierz, 6 – Annopol, 7 – Puławy

Seasonal and multi-year variability of the suspended material transportation in the upper and middle Vistula and in the mouth section of the main tributaries

A – seasonal variability of sediment flux (R) and water (Q) discharge in recording profiles; B – relationship between the multi-year (C_{v1}) and seasonal (C_{v2}) variability coefficients of the suspended material transportation in: a – the Carpathian tributaries, b – upland tributaries, c – lowland tributaries, d – the upper and middle Vistula; bimonthly periods of the hydrological year (Nov. – Oct.) are marked on horizontal axes of the plots; turbidity recording profiles on the Vistula river: 1 – Smolice, 2 – Sierosławice, 3 – Jagodniki, 4 – Szczucin, 5 – Sandomierz, 6 – Annopol, 7 – Puławy

katastrofalnej powodzi w lipcu 1960 r. w Karpatach (Maruszczak 1984b), kiedy maksimum transportu zawiesiny w profilu pomiarowym w Tczewie wystąpiło w lipcu i sierpniu.

TRANSPORT ZAWIESINY W PROFILU PODŁUŻNYM WISŁY

Efektem zróżnicowanej wielkości dostawy zawiesiny do Wisły przez dopływy odwadniające poszczególne regiony geomorfologiczne w dorzeczu jest odmiennie kształtujący się bilans transportu w trzech głównych odcinkach rzeki (Brański 1968a, 1975; Brański, Skibiński 1968; Brański i in. 1980):

http://rcin.org.pl

— w górnej Wiśle po ujście Sanu, w wyniku wzmożonej dostawy zawiesiny, głównie przez dopływy karpackie, masa transportu wzrasta szybko i skokowo;

— w środkowej Wiśle po ujście Bugo-Narwi dostawa zawiesiny do rzeki jest już nieporównanie mniejsza; w wyniku intensywnej sedymentacji transport zawiesiny maleje o połowę;

— w dolnej Wiśle dostawa zawiesiny osiąga również niewielkie rozmiary, transport w profilu podłużnym rzeki jest wyrównany; duże zmiany w transporcie zawiesiny zostały wywołane jej sedymentacją w Zbiorniku Włocławskim (po 1968 r.).

Wzmożona sedymentacja materiału zawiesinowego w Wiśle środkowej, szczególnie w przełomie przez Wyżyny Środkowopolskie, wynika z intensywnej dostawy tego materiału do górnego odcinka rzeki przez dopływy karpackie, a także z malejącej kompetencji rzeki poniżej punktu krytycznego, jakim jest ujście Sanu, gdzie dostawa rumowiska jest największa. Środkowy odcinek Wisły przeciążony transportowaną masą materiału zawiesinowego reprezentuje strefę intensywnej naturalnej sedymentacji materiału klastycznego, erodowanego w górach i wynoszonego na ich przedpole. Lokalna intensywna sedymentacja materiału zawiesinowego na południe od tego odcinka rzeki zaznacza się tylko powyżej zapór wodnych (sedymentacja wymuszona).

Analiza danych pomiarowych z lat 1961—1980 pozwala na dokonanie bardziej szczegółowej, w stosunku do wcześniejszych prac, charakterystyki bilansu transportu zawiesiny w górnej oraz częściowo środkowej Wiśle. Obliczone wartości zawiera tabela 7. Analizowany odcinek Wisły charakteryzuje się ujemnym bilansem transportu, wskazującym na większe rozmiary sedymentacji materiału zawiesinowego na terasie zalewowej w obrębie międzywala w stosunku do dostawy tego materiału pochodzącego z erozji koryta rzeki. Największe natężenie tej sedymentacji zaznacza się w odcinku doliny Wisły od Annopola do Puław, a także od Smolic do Sierosławic. Sedymentacja materiału zawiesinowego w tych odcinkach doliny rzeki wynosi 39,5—52,9% łącznej dostawy, co daje odpowiednio 7719 i 2233 ton materiału zdeponowanego na każdym km biegu koryta rzeki w ciągu roku. Wysokie wartości sedymentacji ustalono także w odcinku doliny od Sierosławic do Jagodnik i od Jagodnik do Szczecina (6106 i 4278 ton na każdym km biegu koryta rzeki w roku).

Cały odcinek Wisły w obrębie Kotlin Podkarpackich i w przełomie przez Wyżyny Środkowopolskie charakteryzuje się naturalną tendencją do sedymentacji materiału zawiesinowego. Wisła, otrzymując z kolejnych dopływów karpackich coraz większe masy zawiesiny, nie może przy malejącym spadku i wzrastającym obciążeniu transportować całości rumowiska. Do ujścia Sanu sedymentacja materiału zawiesinowego w odcinkach bilansowych rzeki (wyznaczonych przez kolejne profile pomiaru zmącenia) bez stopni wodnych wynosi od 10 do 30% całkowitej dostawy. Poniżej ujścia Sanu sedymentacja w dolinie Wisły gwałtownie wzrasta. Transport $\bar{R}$ w Puławach stanowi tylko 64% wartości w Annopolu. Ogółem w analizowanym odcinku doliny Wisły

http://rcin.org.pl

ulega sedymentacji przeciętnie w roku co najmniej 1 160 000 ton materiału zawiesinowego, z czego aż 572 000 ton między Annopolem a Puławami i 239 000 ton między Smolicami i Sierosławicami. Do Annopola ulega sedymentacji 13,4% masy materiału zawiesinowego transportowanego w górnej Wiśle, a do Puław aż 19,8%.

Transport zawiesiny w profilu podłużnym Wisły wykazuje podobne cechy jak w innych większych rzekach przyjmujących dopływy karpackie (np. Cisa, Seret). Z biegiem tych rzek zaznacza się na przedpolu Karpat ogólny wzrost masy transportu $\bar{R}$, zwiększa się również wielkość sedymentacji zawiesiny. Natężenie sedymentacji zależy od wielkości denudacji odpływowej w przyległej części gór i od masy transportu w rzece. Dlatego w dolinie Cisy jest ono średnio ponad czterokrotnie większe niż w dolinie górnej Wisły. W dolinie Seretu jest natomiast aż 8 razy większe, a w dolnym odcinku tej rzeki nawet 11 razy większe (Łajczak 1989a).

* * *

Podstawowym obszarem formowania transportu zawiesiny w Wiśle jest karpacka część dorzecza. Obszar ten decyduje nie tylko o ilości doprowadzanej zawiesiny do rzeki, ale również określa czasową zmienność transportu w profilu podłużnym górnego i środkowego odcinka rzeki, a podczas ekstremalnych wezbrań letnich nawet w odcinku dolnym. Natężenie transportu zawiesiny w poszczególnych karpackich dopływach Wisły jest silnie zróżnicowane, co naświetla problem natężenia erozji w górach. W tym celu konieczne jest poznanie relacji między parametrami transportu zawiesiny a parametrami fizycznogeograficznymi zlewni i parametrami rzek. Analiza zmierza do poznania przyczyn przestrzennego zróżnicowania wielkości i natężenia oraz wieloletniej i sezonowej zmienności transportu zawiesiny w zlewniach karpackich dopływów Wisły.

ZMĄCENIE

Przeciętne roczne zmącenie $\bar{P}_{r2}$ badanych rzek karpackich w profilach pomiarowych, obliczone według założeń zaproponowanej metody, wynosi od 24 do 789 $g \cdot m^{-3}$ (tab. 2), co pośrednio informuje o dużym zróżnicowaniu natężenia erozji w zlewniach. W karpackiej części dorzecza Wisły zaznacza się wyraźna regionalizacja rzek pod względem zmącenia:

– minimalnym zmąceniem odznaczają się górskie odcinki rzek wypływających z Bieszczadów, Beskidu Niskiego i Beskidu Śląskiego, a także odcinki rzek poniżej głębokich zbiorników wodnych ($\bar{P}_{r2}$ od 24 do 160 $g \cdot m^{-3}$);

– zmącenie górskich i pogórskich odcinków rzek wypływających z zachodniej części Beskidów i z Tatr wynosi już 201–466 $g \cdot m^{-3}$;

– zmącenie pogórskich odcinków rzek odwadniających wschodnią część Pogórza Karpackiego jest największe i wynosi 223–789 $g \cdot m^{-3}$;

– zmącenie w nizinnych odcinkach rzek karpackich zmniejsza się i wynosi

http://rcin.org.pl

Tabela 7

Bilans transportu zawiesiny w górnej i częściowo w środkowej Wiśle

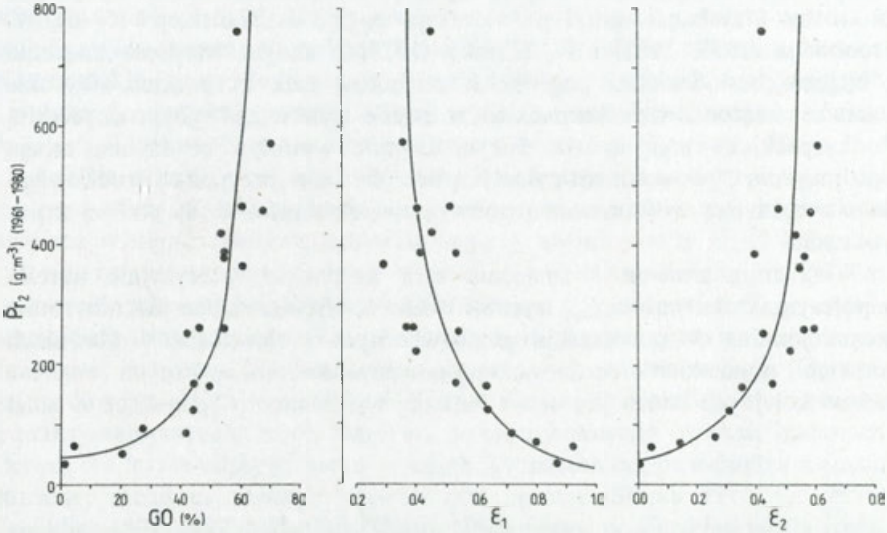
Odcinek bilansowy Wisły	Bieg rzeki (w km)	Dostawa zawiesiny do odcinka Wisły w tonach: kontrolowana: przez rzekę główną	przez dopływy łącznie	razem (a)	niekontrolowana przez dopływy łącznie (szacunek)	razem (b)	Odpływ zawiesiny z odcinka Wisły (w tonach)	Bilans transportu zawiesiny w odcinku bilansowym Wisły (w tonach): na podstawie kontrolowanego ruchu zawiesiny (c)	łącznie z niekontrolowanym ruchem zawiesiny (szacunek) (d)	Sedymentacja zawiesiny (w % całkowitej dostawy do odcinka bilansowego): na podstawie: kolumny (a)	kolumny (b)	Kumulowana wartość dostawy zawiesiny do Wisły (w tonach): na podstawie: kolumny (a)	kolumny (b)	Kumulowana wartość bilansu transportu zawiesiny w Wiśle (w tonach): na podstawie: kolumny (c)	kolumny (d)	Kumulowana wartość sedymentacji zawiesiny (w % całkowitej dostawy do Wisły): na podstawie: kolumny (a)	kolumny (d)	Sedymentacja zawiesiny (w tonach/km biegu koryta rzeki w roku): w odcinku bilansowym rzeki	wartość kumulowana wzdłuż biegu rzeki
źródło – Skoczów	0,0 – 35,1	16800	–	16800	–	16800	16800	0	0	0,0	0,0	16800	16800	0	0	0,0	0,0	0	0
Skoczów – Goczałkowice	35,1 – 68,4	16800	–	16800	6800	23600	15400	–1400	–8200	8,3	34,7	33600	40400	–1400	–8200	4,2	20,3	246	120
Goczałkowice – Smolice	68,4 – 129,5	15400	394300	409700	29000	438700	391000	–18700	–47700	4,6	10,9	443300	479100	–20100	–55900	4,5	11,7	781	432
Smolice – Sierosławice	129,5 – 236,7	391000	–	391000	61400	452400	213000	–178000	–239400	45,5	52,9	834300	931500	–198100	–295300	23,7	31,7	2233	1248
Sierosławice – Jagodniki	236,7 – 259,3	213000	213500	426500	38900	465400	327400	–99100	–138000	23,2	29,7	1260800	1396900	–297200	–433300	23,6	31,0	6106	1671
Jagodniki – Szczucin	259,3 – 300,3	327400	328100	655500	13900	669400	494000	–161500	–175400	24,6	26,2	1916300	2066300	–458700	–608700	23,9	29,5	4278	2027
Szczucin – Sandomierz	300,3 – 374,6	494000	395000	889000	13200	902200	989000	+100000	+86800	–	–	2805300	2968500	–358700	–521900	12,8	17,6	–	1393
Sandomierz – Annopol	374,6 – 404,6	989000	444800	1434000	6130	1440000	1373000	–61000	–67000	4,3	4,7	4239300	4408500	–419700	–588900	9,9	13,4	2233	1456
Annopol – Puławy	404,6 – 478,7	1373000	37900	1411000	37600	1449000	877000	–534000	–572000	37,8	39,5	5650300	5657500	–953700	–1160900	16,9	19,8	7719	2425
źródło – Annopol	0,0 – 404,6			4239300		4408500		–419700	–588900	9,9	13,4								1456
źródło – Puławy	0,0 – 478,7			5650300		5857500		–953700	–1160900	16,9	19,8								2425

Objaśnienia: wartości bilansu transportu ustalono na podstawie danych $\bar{R}_{r,t}$ obliczonych według obowiązującej metody obliczeniowej.

http://rcin.org.pl

229 – 367 $g \cdot m^{-3}$; zmącenie autochtonicznych rzek na nizinnym przedpolu Karpat wynosi już tylko 30 – 50 $g \cdot m^{-3}$.

Spośród analizowanych parametrów fizycznogeograficznych zlewni największy wpływ na wielkość przeciętnego zmącenia rzek wywierają parametry określające użytkowanie ziemi (ryc. 7). Badane zależności mają charakter



Ryc. 7. Zależność między przeciętnym rocznym zmąceniem rzek ($\bar{P}_{r2}$) w profilach pomiarowych karpackich dopływów Wisły a powierzchnią gruntów ornych w zlewni (GO – % powierzchni zlewni), współczynnikiem lesistości zlewni (ε_1) i współczynnikiem rozwinięcia powierzchni gruntów ornych w zlewni (ε_2)

Relationship between mean annual turbidity ($\bar{P}_{r2}$) in the recording profiles in the Carpathian tributaries of the Vistula and the area of the arable fields in the catchment (GO – in % of catchment area), coefficient of the development of the forested area (ε_1) and coefficient of the development of the arable fields (ε_2) in catchments

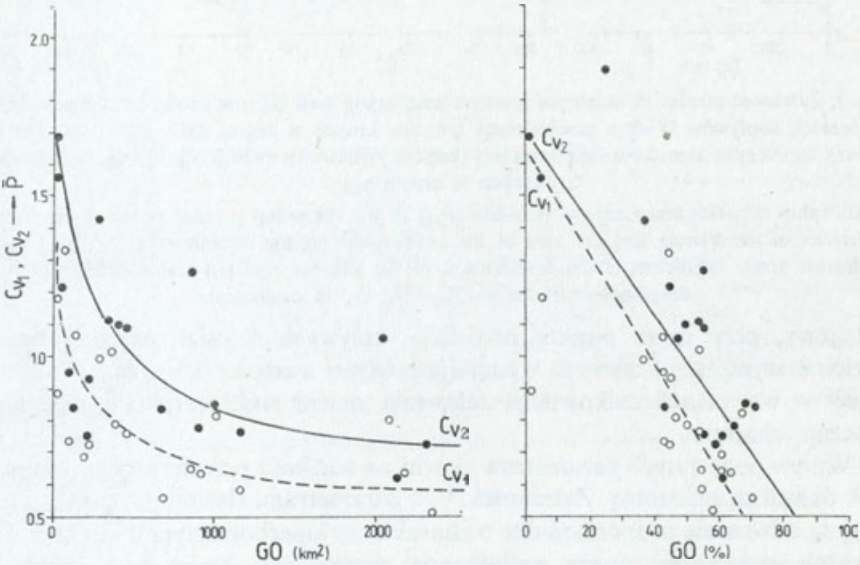
potęgowy, przy czym punkty przecięcia krzywych z osią rzędnych bądź poziome asymptoty krzywych występują powyżej wartości 0,0. Oznacza to, że nawet w warunkach całkowitego zalesienia zlewni rzeki karpackie osiągają znaczne zmącenie.

Wpływ pozostałych parametrów zlewni na wielkość przeciętnego zmącenia rzek okazał się nieistotny. Zależności $\bar{P}_{r2}$ z parametrami zlewni: ψ, $\bar{O}_r$, $\bar{O}_{rmax}$, $\bar{q}_r$, $\bar{q}_{rmax}$ są odwrotnie proporcjonalne o charakterze hiperbolicznym ($r < |0{,}6|$). Tę pozorną sprzeczność można wytłumaczyć następująco. Zwiększenie opadów i odpływu jednostkowego, a także spadków w zlewniach następuje w polskich Karpatach w kierunku południowym, co nie znajduje odzwierciedlenia we wzroście zmącenia rzek. Zaznaczający się w tym kierunku wzrost lesistości zlewni, a także coraz korzystniejsze rozmieszczenie lasów w zlewniach (a więc zmniejszenie powierzchni z gruntami ornymi), skutecznie przeciwdziała wzrostowi wartości wymienionych wyżej parametrów zlewni.

http://rcin.org.pl

Zaprezentowane zależności korelacyjne tłumaczą coraz szybszy wzrost zmącenia $\bar{P}_{r2}$ w profilach podłużnych karpackich dopływów Wisły w kierunku wschodnim. Malejąca w tym kierunku powierzchnia gruntów ornych w Beskidach oraz wzrastająca szerokość rolniczo użytkowanego Pogórza Karpackiego powoduje, że największy wzrost przeciętnego zmącenia zaznacza się w środkowym biegu Sanu. Między Leskiem a Dynowem wzrost ten jest aż 29-krotny. Uzyskane wyniki potwierdzają pogląd J. Brańskiego (1975), W. Froehlicha (1975, 1982) i K. Klimka (1979) o stałym wzroście zmącenia z biegiem beskidzkich i pogórskich odcinków rzek karpackich. Wysokie wartości zmącenia rzek karpackich w strefie wylotu z Pogórza do Kotlin Podkarpackich mogą być w dużym stopniu wywoływane szybką erozją wgłębną koryt, podcinaniem pylastych brzegów, a w przypadku środkowego Sanu zwiększoną częstotliwością podwyższonych stanów wody poniżej zapór wodnych.

Wieloletnią zmienność zmącenia rzek karpackich precyzyjnie określa współczynnik zmienności C_{v1} (ryc. 8). Wielkość współczynnika jest odwrotnie proporcjonalna do powierzchni gruntów ornych w zlewniach. W zlewniach górskich i pogórskich o coraz większej powierzchni gruntów ornych zmącenie rzek w kolejnych latach jest coraz bardziej wyrównane (C_{v1} maleje). Z kolei



Ryc. 8. Zależność między współczynnikiem zmienności wieloletniej (C_{v1}) i sezonowej (C_{v2}) parametru (P) a powierzchnią gruntów ornych (GO) w zlewniach.
Parametr (P) obliczono według założeń zaproponowanej metody; GO – podano w km^2 oraz w % powierzchni zlewni

Relationship between the multi-year (C_{v1}) and seasonal (C_{v2}) variability coefficients of the parameter (P) and area of arable fields in catchments (GO). Parameter (P) calculated according to the proposed method; GO – in km^2 and in % of catchment area

http://rcin.org.pl

w zlewniach o większym zalesieniu dostawa zwietrzelin do wód rzecznych jest w większym stopniu niewyrównana przestrzennie i czasowo. Dostawa ta jest więc ograniczona do coraz mniejszych obszarów. Zaprezentowane wyniki są potwierdzeniem faktu, że lasy i użytki zielone spełniają rolę ochronną wobec pokryw zwietrzelinowo-glebowych. Ochronna rola lasu jest skuteczna jedynie w latach o małym lub średnim natężeniu zjawisk hydrometeorologicznych, wówczas zmącenie rzek jest niewielkie. Natomiast w latach o dużym natężeniu tych zjawisk, nawet w rzekach odwadniających silnie zalesione zlewnie bieszczadzkie, zmącenie znacznie wzrasta. W zlewniach silnie wylesionych i o dużej powierzchni gruntów ornych wysokie zmącenia są notowane także w latach o przeciętnym natężeniu odpływu ze zlewni (Łajczak 1988a).

Analiza różnic przeciętnych *RP* (tab. 6) wskazuje, że większy wpływ (tzn. mniejsze wartości *RP*) na wieloletnią zmienność zmącenia rzek karpackich wywiera wielkość odpływu jednostkowego $\bar{q}$, aniżeli opady $\bar{O}$. Z kolei ten czasowy rytm zmącenia rzek jest w większym stopniu regulowany przebiegiem maksymalnych wartości odpływu jednostkowego $\bar{q}_{rmax}$ i opadów $\bar{O}_{rmax}$, aniżeli wartościami średnimi $\bar{q}$ i $\bar{O}$. Ostatecznie największy wpływ na wieloletnią zmienność zmącenia rzek karpackich wywiera maksymalna wartość odpływu jednostkowego, która w warunkach Karpat fliszowych może być utożsamiona z maksymalnym natężeniem odpływu powierzchniowego (w skali badanych zlewni). Ta forma odpływu jest w polskich Karpatach odpowiedzialna za duże rozmiary erozji na stokach zajętych pod uprawy (Słupik 1973; Gil 1976; Froehlich 1975, 1982; Froehlich, Słupik 1980). Spływ powierzchniowy w wyniku drenowania płytkich pokryw stokowych wywołuje również silną erozję dróg polnych i leśnych (Froehlich 1982; Froehlich, Słupik 1986). Z tych powodów ten dynamiczny parametr zlewni jest zalecany do analizy transportu zawiesiny w rzekach karpackich (Starkel 1980).

W cyklu rocznym zmącenie rzek karpackich wykazuje dwa główne maksima: letnie deszczowe i wiosenne roztopowe, a także dwa drugorzędne: jesienne deszczowe i zimowe roztopowe (tab. 3). Sezonowy rozkład zmącenia naśladuje więc zmiany opadów, przepływu rzek i odpływu jednostkowego. W zlewniach beskidzkich dominuje letnia kulminacja zmącenia, kulminacja wiosenna jest znacznie mniejsza. Stopniowe topnienie pokrywy śnieżnej i powolne odmarzanie gruntu na ogół nie sprzyjają gwałtownej dostawie zwietrzelin do rzek. Wraz z obniżeniem średniej wysokości zlewni npm. i związanym z tym wzrostem udziału rolniczych pogórzy w ich powierzchni, zwiększa się wysokość wiosennej roztopowej kulminacji zmącenia. Na Pogórzu Karpackim kulminacja ta jest równorzędna kulminacji letniej, a w niższych odcinkach rzek jest już dominująca. Zbieżność sezonowego rozkładu zmącenia *P* i przepływu *Q* jest ścisła dopiero w nisko położonych piętrach hipsograficznych polskich Karpat, co wskazuje na większe wykorzystanie możliwości erozyjnych wód roztopowych w tym obszarze, w stosunku do obszarów średniogórskich. Zbieżność ta jest uzależniona nie tylko od warunków klimatycznych, lecz także od użytkowania ziemi w zlewniach.

http://rcin.org.pl

W zlewniach górskich o dużym zalesieniu największe średnie miesięczne zmącenie rzek stwierdza się w lipcu, co stanowi efekt wysokich opadów. Zmącenie rzek w czerwcu i sierpniu jest już znacznie mniejsze. W zlewniach o dużej powierzchni gruntów ornych i gęstej sieci dróg polnych zmącenie rzek jest znacznie większe, przy czym największe średnie miesięczne zmącenie stwierdza się w czerwcu, rzadziej w sierpniu i w lipcu. Odsłonięcie gleb ornych i ich spulchnianie, a także częste użytkowanie dróg polnych w kwietniu, maju oraz we wrześniu i październiku, nie znajduje efektu w tak wysokim zmąceniu rzek jak latem, z uwagi na niższe opady o mniejszej intensywności.

Na podstawie danych pomiarowych IMGW i danych zaczerpniętych z literatury można przedstawić następującą relację między maksymalnym zmąceniem cieków stałych i epizodycznych w polskich Karpatach a powierzchnią ich zlewni:

A (km^2)	$P_{max\ obserw}$ (g·m^{-3})
$10^{-3} - 10^{-2}$	$10^5 - 10^6$
$10^1 - 10^3$	$10^3 - 10^4$
$10^4 - 10^5$	10^3

Zmienność średnich miesięcznych zmąceń w roku hydrologicznym dokładnie określa współczynnik zmienności C_{v2}, który podobnie jak współczynnik zmienności wieloletniej C_{v1} wykazuje odwrotnie proporcjonalną zależność z powierzchnią gruntów ornych w zlewniach (ryc. 8).

W okresie letnim ochronna rola lasów wobec pokryw zwietrzelinowo-glebowych jest często nieskuteczna, nie tylko w zlewniach o dużym udziale zmienionego drzewostanu (sztuczne świerczyny na miejscu wcześniejszych lasów mieszanych regla dolnego), ale również w zlewniach z lasami liściastymi (Bieszczady). Maksymalne zmierzone zmącenie przekracza latem w rzekach bieszczadzkich nawet 6000 g·m^{-3}, a w rzekach zachodniokarpackich nawet 20 000 g·m^{-3}. Wynika to ze wzmożonej dostawy zwietrzelin z gęstej sieci dróg polnych i leśnych oraz z rozcięć erozyjnych (Froehlich, Słupik 1980; Froehlich 1982), lokalnie zaś z ruchów masowych na podcinanych stokach.

Sezonowa zmienność zmącenia rzek karpackich jest, podobnie jak zmienność wieloletnia, w największym stopniu kształtowana przez maksymalny odpływ jednostkowy.

Porównanie współczynników zmienności wieloletniej C_{v1} i sezonowej C_{v2} wskazuje na następujące prawidłowości określające zmącenie rzek karpackich:

– Zdecydowana większość profilów pomiarowych charakteryzuje się większą zmiennością sezonową zmącenia ($C_{v2} > C_{v1}$), co jest typową cechą rzek górskich tej strefy klimatycznej. Mniejszą zmienność sezonową od zmienności wieloletniej stwierdza się natomiast w odcinkach rzek bezpośrednio poniżej zapór wodnych (efekt sedymentacji materiału zawiesinowego w zbiornikach podczas wezbrań), a także w rzekach o intensywnej sedymentacji tego materiału.

http://rcin.org.pl

— Zależność współczynników zmienności C_{v1} i C_{v2} jest na ogół wprost proporcjonalna. Ze wzrostem powierzchni gruntów ornych w zlewniach oba typy zmienności zmącenia maleją, tzn. przebieg zmącenia w czasie jest w coraz większym stopniu wyrównany. Jednocześnie wzrasta w tym kierunku przeciętne roczne zmącenie rzek. Z kolei efektem wzrostu zalesienia zlewni jest szybkie zmniejszanie zmącenia rzek (głównie od września do maja, w pozostałych miesiącach ten spadek zmącenia jest już mniejszy), przy jednoczesnym zwiększeniu jego zmienności w wieloleciu i w cyklu rocznym.

NATĘŻENIE TRANSPORTU PODCZAS WEZBRAŃ

Pętlicowy charakter związku między zmąceniem a przepływem powoduje, że badane rzeki charakteryzują się brakiem ścisłej zależności $P - Q$. Graficznym obrazem tego związku jest chmura punktów na diagramie korelacyjnym pokrywająca szeroką strefę. Bardziej ścisłe związki uzyskujemy porównując przepływ Q z unoszeniem U. Zależność $Q - U$ ma na ogół charakter paraboliczny, a rozrzut punktów zawsze przekracza $\pm 20\%$. Rozrzut punktów maleje z biegiem rzek, a więc ze wzrostem przepływu i jest największy w górnych odcinkach rzek o zlewniach intensywnie wykorzystywanych rolniczo.

Skrajne wartości unoszenia U w danym profilu pomiarowym mogą różnić się nawet o 8 rzędów wielkości. W okresach międzywezbraniowych unoszenie często maleje nawet poniżej 0,001 $kg \cdot s^{-1}$. Maksymalne wartości unoszenia często przekraczają podczas wezbrań 100 $kg \cdot s^{-1}$, a podczas letnich wezbrań nawet 1000 $kg \cdot s^{-1}$. Największymi wartościami unoszenia charakteryzuje się Dunajec: U_{max} w Krościenku wynosi 6200 $kg \cdot s^{-1}$, w Nowym Sączu zaś osiąga 10 000 $kg \cdot s^{-1}$ (powódź w lipcu 1960 r.). Największe wartości unoszenia stwierdza się podczas wezbrań letnich. Są one kilkakrotnie większe od maksymalnych wartości unoszenia z okresu wezbrań roztopowych.

Z geomorfologicznego punktu widzenia analiza unoszenia w rzekach karpackich może być zawężona do wartości maksymalnych U_{max}. Podczas kulminacyjnych przepływów zawiesiny, wyprzedzających lub równoczesnych z kulminacyjnym przepływem wezbraniowym Q_{max}, są transportowane duże ilości materiału zawiesinowego, decydujące o rozmiarach transportu podczas wezbrań. K. Klimek (1979) wykazał, że większe rzeki badanego obszaru cechuje dość ścisła zależność $Q - U_{max}$ tylko wówczas, gdy podczas wezbrań zostanie przekroczona pewna graniczna wartość przepływu.

Maksymalne wartości unoszenia U_{max} z kolejnych wezbrań z lat 1961—1980 wykazują we wszystkich badanych profilach pomiarowych ścisły związek z odpowiadającym im przepływem Q. Związek ten w układzie logarytmicznym ilustruje linia prosta. Krzywe te, reprezentujące poszczególne rzeki, zajmują różne położenie na wykresie. Informują więc o zróżnicowanym maksymalnym natężeniu transportu zawiesiny w rzekach. Im krzywa jest położona bliżej osi U_{max}, tym bardziej intensywny transport zawiesiny w rzece reprezentuje, gdyż temu samemu przepływowi Q odpowiada większa wartość

http://rcin.org.pl

unoszenia U_{max}. Dlatego blisko osi Q są zlokalizowane krzywe reprezentujące rzeki odwadniające silnie zalesione zlewnie, a także odcinki rzek poniżej zapór wodnych. Z kolei blisko osi U_{max} występują krzywe reprezentujące rzeki, które odwadniają zlewnie wykorzystywane rolniczo. Taka kolejność krzywych jest zachowana we wszystkich miesiącach.

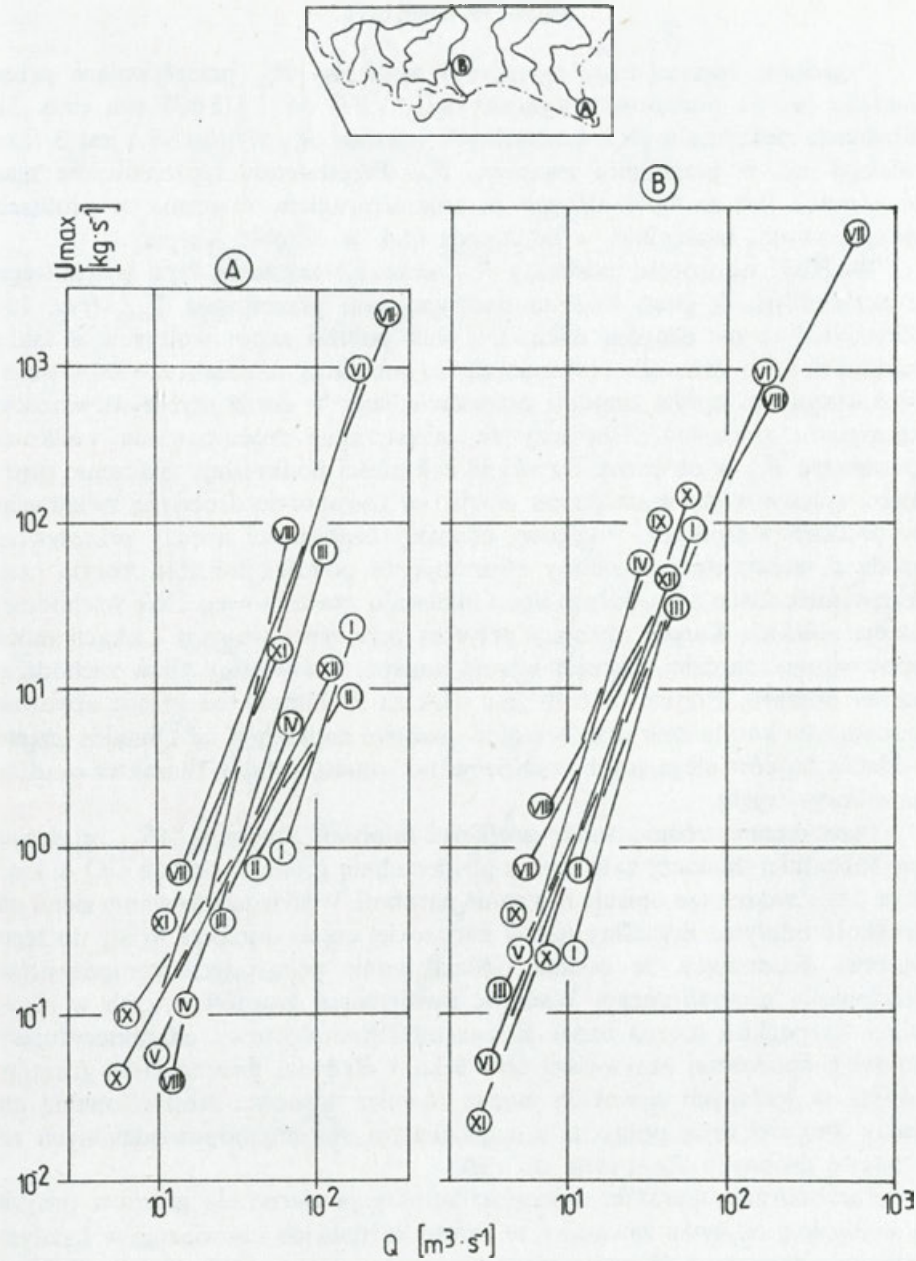
Rzeki reprezentowane przez skrajnie położone krzywe na wykresie różnią się natężeniem transportu wezbraniowego zawiesiny aż o 3 rzędy wielkości. Pomijając jednak odcinki rzek poniżej zapór wodnych różnica ta wynosi 2 rzędy wielkości. Wartość ta może informować o przeciętnej z wielolecia różnicy w natężeniu erozji i kulminacji transportu zawiesiny podczas wezbrań w zlewniach karpackich o skrajnie różnym stopniu zalesienia i rolniczego wykorzystania. Kolejność krzywych w związku $U_{max} - Q$ reprezentujących poszczególne profile pomiarowe jest analogiczna jak w przypadku przeciętnego zmącenia $\bar{P}_{r2}$.

Natężenie maksymalnego wezbraniowego transportu zawiesiny jest zmienne w ciągu roku, czego ilustracją może być zróżnicowane położenie krzywych zależności $U_{max} - Q$ w kolejnych miesiącach. Zaznaczają się istotne różnice w sezonowej zmienności względnego natężenia transportu zawiesiny w rzekach karpackich odwadniających zlewnie różniące się rolniczym użytkowaniem. Zagadnienie to przykładowo ilustrują krzywe zależności $U_{max} - Q$ w Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu i w Sanie w Zatwarnicy (ryc. 9), czyli w zlewniach beskidzkich o podobnej wielkości oraz podobnych cechach środowiska geograficznego, ale o zdecydowanie odmiennym użytkowaniu.

W zlewni górnego Sanu o zalesieniu 80% i powierzchni z gruntami ornymi tylko około 5 km^2, przebieg zależności $U_{max} - Q$ można uznać za typowy dla zlewni o niewielkiej ingerencji człowieka. Względne natężenie procesów morfogenetycznych w tej zlewni naśladuje zmienność zmącenia P i odpływu zawiesiny R. Natężenie tych procesów rośnie więc od stycznia do czerwca lub lipca, po czym maleje do grudnia. Taka zmienność stanowi proste odbicie przebiegu opadów w zalesionej zlewni beskidzkiej. Przebieg zależności $U_{max} - Q$ w Kamienicy Nawojowskiej o zalesieniu 43% i powierzchni z gruntami ornymi 103 km^2 jest inny. Względne natężenie procesów morfogenetycznych w tej rolniczo użytkowanej zlewni beskidzkiej jest we wszystkich miesiącach większe (średnio 100 razy) niż w zalesionej zlewni górnego Sanu. To natężenie erozji i transportu zawiesiny zwiększa się od stycznia do kwietnia, by następnie maleć do grudnia. Tylko we wrześniu i październiku zaznacza się ponowny wzrost względnego natężenia erozji, podobny do wzrostu wiosennego. Ten wiosenny i jesienny wzrost względnego natężenia procesów morfologicznych w rolniczo użytkowanej części Karpat można wytłumaczyć tylko przebiegiem prac polowych w tych miesiącach, a zwłaszcza częstym użytkowaniem dróg polnych.

Wzrost względnego natężenia erozji w okresie późnej zimy, wiosny i jesieni, wywołany działalnością człowieka, tłumaczy dlaczego w wylesionych oraz użytkowanych rolniczo zlewniach karpackich zaznacza się bardzo duży wzrost zmącenia jak też odpływu zawiesiny w miesiącach pozaletnich.

http://rcin.org.pl



Ryc. 9. Sezonowa zmienność zależności między maksymalnym sekundowym przepływem zawiesiny podczas wezbrań (U_{max}) i przepływem (Q)

A – San (Zatwarnica), B – Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz); poszczególne krzywe przedstawiają zależności w kolejnych miesiącach roku hydrologicznego

Seasonal variability of relationships between maximum flux of suspended load during floods (U_{max}) and water discharges (Q)

A – San (Zatwarnica), B – Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz); individual curves characterized relationships in subsequent months of a hydrological year

http://rcin.org.pl

MASA TRANSPORTU

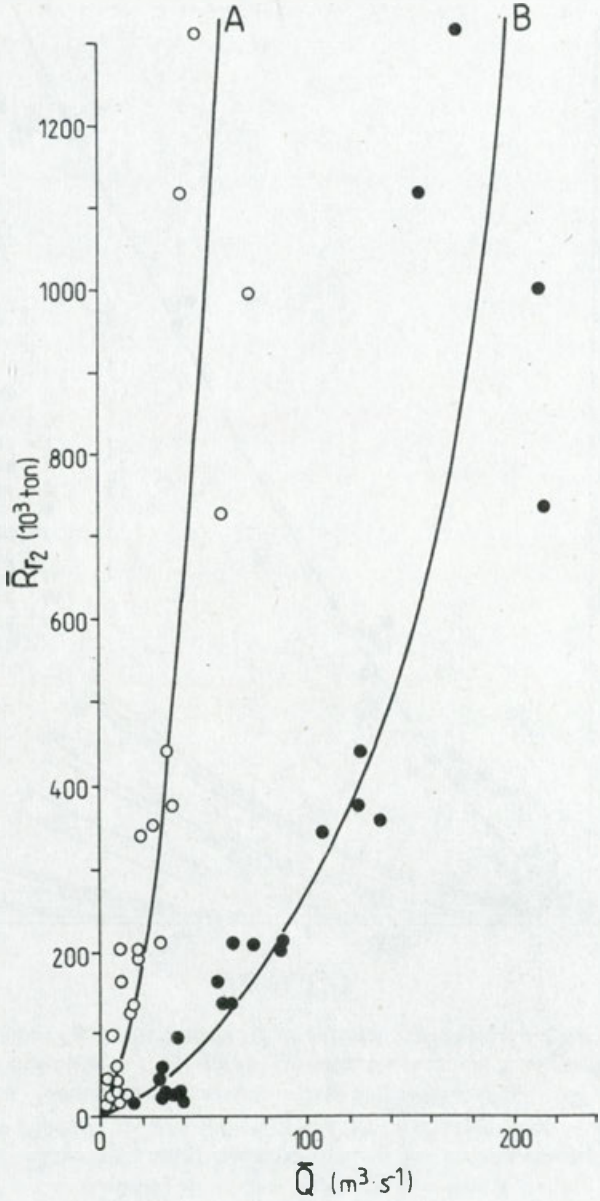
Przeciętne roczne masy transportu zawiesiny $\bar{R}_{r2}$ przepływające przez badane profile pomiarowe wynoszą od 13 500 do 1 318 000 ton (tab. 3). Stosunek maksymalnych i minimalnych wartości $\bar{R}_{r2}$ wynosi 98 i jest 3 razy większy niż w przypadku zmącenia $\bar{P}_{r2}$. Przestrzenne zróżnicowanie mas transportu jest na ogół zbieżne ze zróżnicowaniem zmącenia w profilach pomiarowych, szczególnie w odcinkach rzek w obrębie Karpat.

Wielkość transportu zawiesiny $\bar{R}_{r2}$ wykazuje zależność typu potęgowego z przeciętnym Q_r oraz średnim maksymalnym przepływem Q_{max} (ryc. 10). Zależności te nie dotyczą odcinków rzek poniżej zapór wodnych, a także nizinnych odcinków rzek z intensywną sedymentacją materiału zawiesinowego. Wzrastający przepływ znajduje odzwierciedlenie w coraz szybszym wzroście transportu zawiesiny. Tłumaczy to przestrzenne zróżnicowanie wielkości parametru $\bar{R}_{r2}$ w obszarze. Uzyskane zależności podkreślają znaczenie prędkości spływu wody w natężeniu erozji i w transporcie drobnych zwietrzelin w polskich Karpatach. Potęgowy charakter zależności między przepływem wody a transportem zawiesiny informuje, że podczas wezbrań koryta rzek karpackich dostarczają dużych ilości materiału zawiesinowego. We wschodniej części polskich Karpat mniejszy przyrost przepływu wody w rzekach może spowodować bardziej znaczący wzrost transportu zawiesiny niż w zachodniej części obszaru. Przyczyną tego jest większa podatność na erozję utworów budujących koryta rzek oraz brzegi w obszarze na wschód od Dunajca (częste wkładki łupków ulegających szybkiemu lasowaniu, pylasty charakter osadów pozakorytowych).

Przestrzenne zróżnicowanie wielkości odpływu zawiesiny $\Delta\bar{R}_{r2}$ ze zlewni najdokładniej tłumaczy zależność z powierzchnią gruntów ornych GO w km^2 (ryc. 11). Związek ten opisuje równanie paraboli. Wpływ użytkowania ziemi na wielkość odpływu zawiesiny jest w karpackiej części dorzecza Wisły do tego stopnia dominujący, że zaciera oddziaływanie pozostałych komponentów środowiska geograficznego. Wielkość powierzchni gruntów ornych w zlewniach karpackich można uznać za parametr kompleksowy, charakteryzujący całość gospodarczej aktywności człowieka. Całkowitą powierzchnię gruntów ornych w badanych zlewniach można również uznać za proporcjonalną do sumy długości dróg polnych, w największym stopniu odpowiedzialnych za dostawę drobnych zwietrzelin do rzek.

Paraboliczny charakter zależności między powierzchnią gruntów ornych a wielkością odpływu zawiesiny ze zlewni karpackich obowiązuje w każdym interwale czasowym. W przypadku interwałów miesięcznych wzrost odpływu zawiesiny jest największy w miesiącach o dużym transporcie (luty – sierpień), kiedy drogi polne, a także leśne, są erodowane podczas roztopów wiosennych, a szczególnie intensywnie podczas wiosennych i letnich ulew. W miesiącach o największym transporcie (czerwiec – lipiec) podane zależności charakteryzuje współczynnik korelacji $r > 0{,}80$.

http://rcin.org.pl



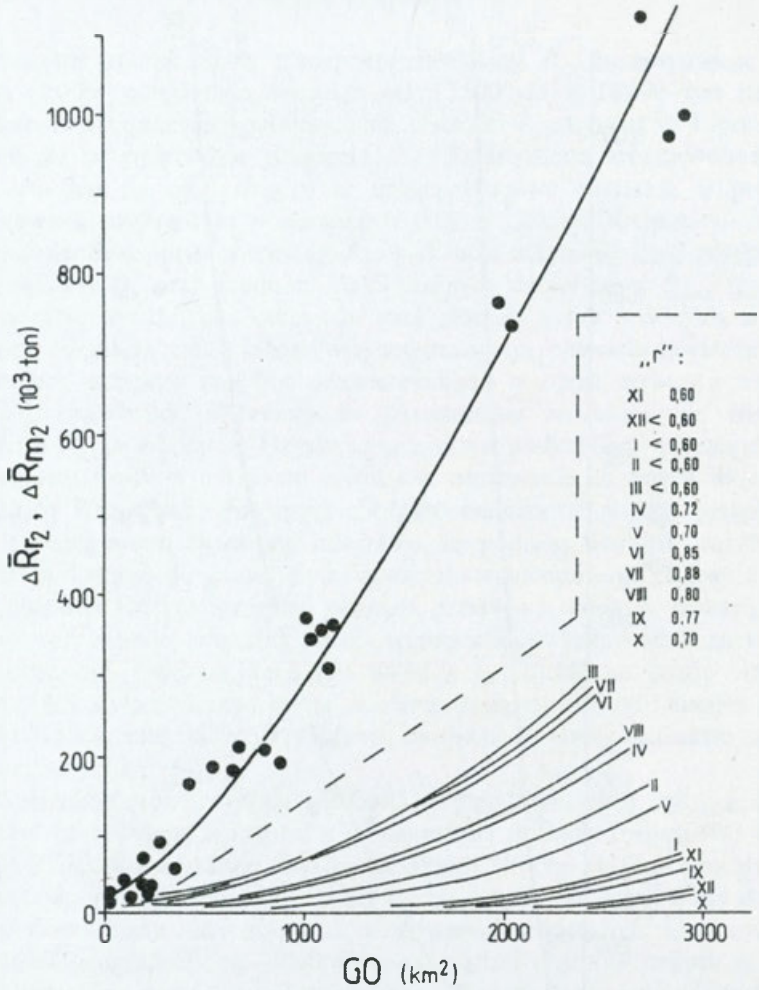
Ryc. 10. Zależność między przeciętnym rocznym przepływem zawiesiny przez profile pomiarowe a przeciętnym przepływem rzek (A) i średnim maksymalnym przepływem rzek (B) w wieloleciu 1961 – 1980

$\bar{R}_{r2}$ – przepływ zawiesiny; $\bar{Q}$ – przepływ rzek

Relationship between the mean annual suspended material flux in the recording profiles and mean river discharge (A) and average maximum river discharge (B) in the period of 1961 – 1980

$\bar{R}_{r2}$ – the suspended material flux; $\bar{Q}$ – the river discharge

http://rcin.org.pl



Ryc. 11. Zależność między przeciętnym rocznym ($\Delta \bar{R}_{r2}$) i miesięcznym ($\Delta \bar{R}_{m2}$) odpływem zawiesiny ze zlewni karpackich a powierzchnią gruntów ornych (GO) w wieloleciu 1961 – 1980

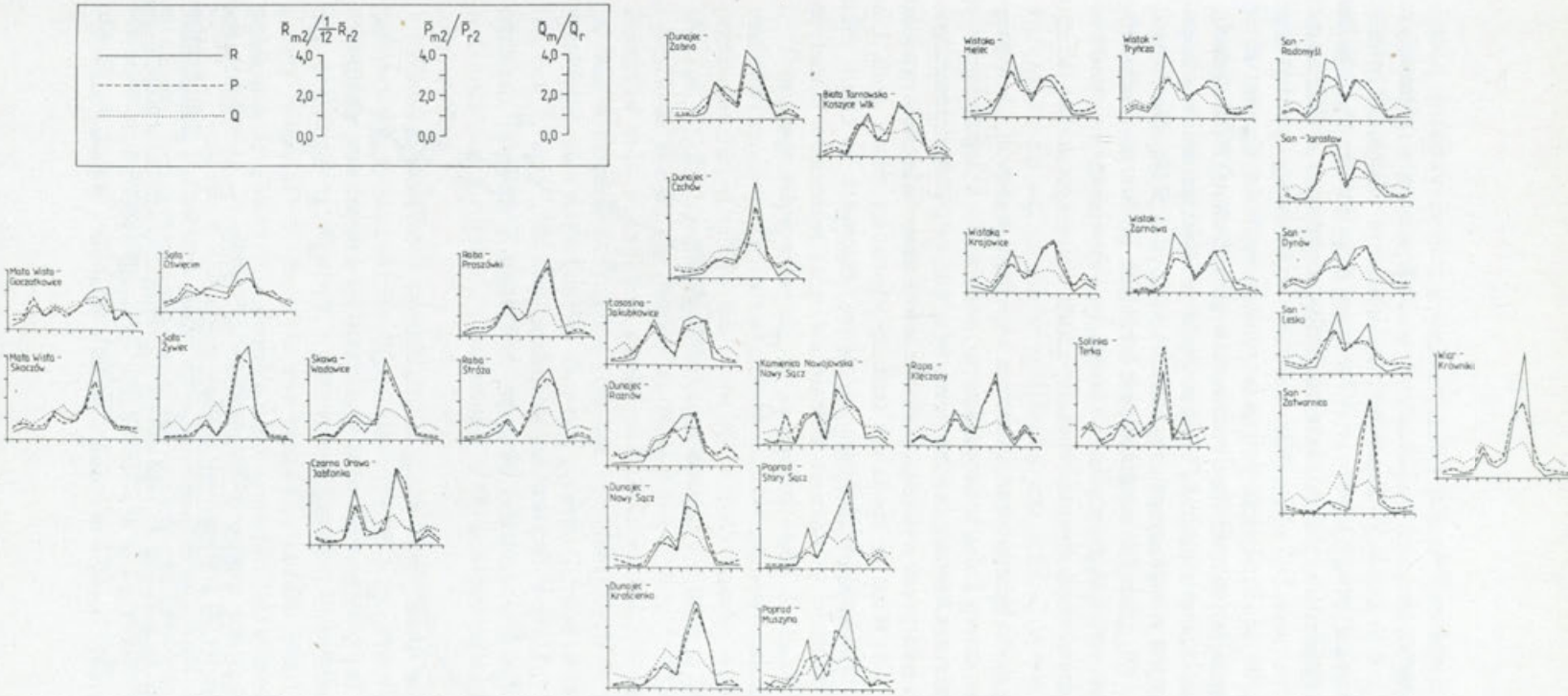
„r" – współczynnik korelacji; XI – X – miesiące roku hydrologicznego

Relationship between the mean annual ($\Delta \bar{R}_{r2}$) and monthly ($\Delta \bar{R}_{m2}$) suspended sediment outflow from the Carpathian catchments and the area of arable fields (GO) within these catchments

„r" – correlation coefficient; XI – X – months of the hydrological year

Maksymalne roczne masy transportu zawiesiny przepływające przez poszczególne profile pomiarowe przekroczyły w beskidzkich odcinkach rzek wartości minimalne roczne z lat 1961 – 1980 nawet 83 razy, natomiast wartości przeciętne roczne tylko 6 razy. W pogórskich odcinkach rzek rozpiętość tych wahań nie przekroczyła już 20. Rozpiętość wahań rocznych mas transportu była więc w badanym wieloleciu większa niż przeciętnych rocznych zmąceń.

http://rcin.org.pl



Ryc. 12. Sezonowa zmienność odpływu zawiesiny (R) na tle zmian zmącenia (P) i przepływu (Q) w karpackich dopływach Wisły

Na poziomych osiach wykresów zaznaczono kolejne miesiące roku hydrologicznego (XI – XI).

Seasonal variability of the suspended sediment outflow (R) against the background of the changes of turbidity (P) and discharge (Q) in the Carpathian tributaries of the Vistula

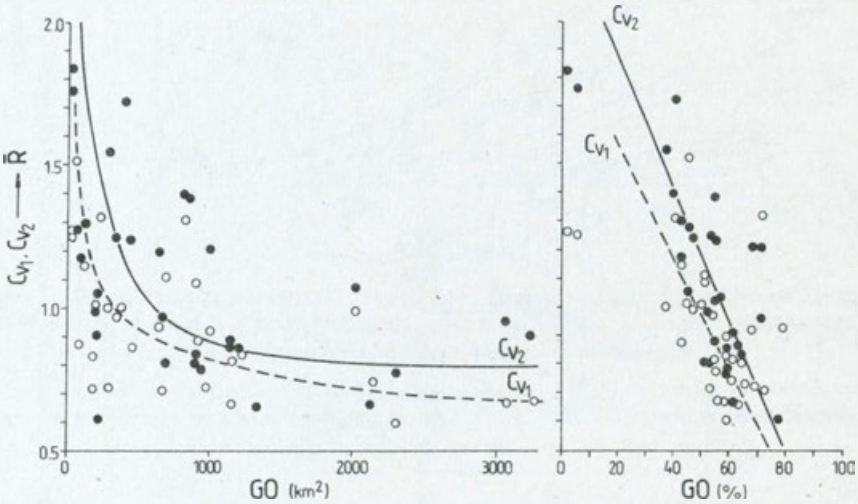
Succesive monthly periods of the hydrological year (Nov. – Nov.) are marked on the horizontal axes of the plots.

http://rcin.org.pl

Wieloletnią zmienność rocznych mas transportu zawiesiny można, podobnie jak w przypadku zmącenia, scharakteryzować za pomocą współczynnika zmienności C_{v1}. Wartość tego współczynnika wykazuje odwrotnie proporcjonalną zależność z powierzchnią gruntów ornych w zlewni. Przykładem obszarów o skrajnie różnej zmienności wieloletniej przepływu zawiesiny przez profile pomiarowe może być górna (bieszczadzka) i środkowa (pogórska) część dorzecza Sanu. W części pogórskiej współczynnik zmienności C_{v1} jest nawet czterokrotnie mniejszy niż w silnie zalesionych zlewniach w Bieszczadach.

Analiza różnic przeciętnych RP wskazuje, że wieloletnia zmienność odpływu zawiesiny jest w większym stopniu uzależniona od średniego maksymalnego przepływu Q_{rmax}, aniżeli od przepływu średniego Q_r. Stanowi to kolejne potwierdzenie dominującego wpływu krótkotrwałych zjawisk hydrometeorologicznych o dużym natężeniu na wielkość erozji i transportu fluwialnego w Karpatach.

W rocznym cyklu hydrologicznym można wyróżnić, podobnie jak w przypadku zmącenia, cztery kulminacje transportu zawiesiny, z których dominują tylko letnia deszczowa i wiosenna roztopowa. Względne wysokości poszczególnych kulminacji transportu wykazują podobne zróżnicowanie jak w przypadku zmącenia (ryc. 12). Wraz ze spadkiem średniej wysokości zlewni npm. i ze zmniejszaniem wysokości względnych w zlewni, transport w ciągu roku wyrównuje się. Stanowi to odzwierciedlenie nie tylko warunków klimatycz-



Rac. 13. Zależność między współczynnikiem zmienności wieloletniej (C_{v1}) i sezonowej (C_{v2}) parametru (R) a powierzchnią gruntów ornych (GO) w zlewniach

Parametr (R) obliczono według założeń zaproponowanej metody; GO — podano w km² oraz w % powierzchni zlewni.

Relationship between the multi-year (C_{v1}) and seasonal (C_{v2}) variability coefficient of the parameter (R) and area of arable fields in catchments (GO)

Parameter (R) calculated according to the proposed method; GO — in km² and % of catchment area.

http://rcin.org.pl

nych, ale również podatności erozyjnej brzegów rzek oraz tempa erozji wgłębnej koryt rzecznych, które zwiększają się z biegiem karpackich dopływów Wisły. Dlatego w beskidzkich odcinkach rzek stosunek największych i najmniejszych przeciętnych miesięcznych mas transportu zawiesiny przekracza nawet 200, w pogórskich odcinkach rzek wyjątkowo osiąga 100, w nizinnych zaś nie przekracza 50.

Sezonowa zmienność transportu zawiesiny określona przez współczynnik zmienności C_{v2} wskazuje, że wzrost powierzchni gruntów ornych w zlewniach wpływa stabilizująco na wielkość przepływającej masy zawiesiny przez profile pomiarowe. Wpływa więc stabilizująco na wielkość masy zawiesiny odpływającej ze zlewni (C_{v2} maleje). Zależności między GO w km^2 i GO w % a C_{v2} mają podobny charakter do przypadku zmącenia (ryc. 13).

Sezonowa zmienność transportu zawiesiny w badanych rzekach karpackich, podobnie jak zmienność wieloletnia, jest w największym stopniu uzależniona od przebiegu średniego maksymalnego przepływu $\bar{Q}_{rmax}$.

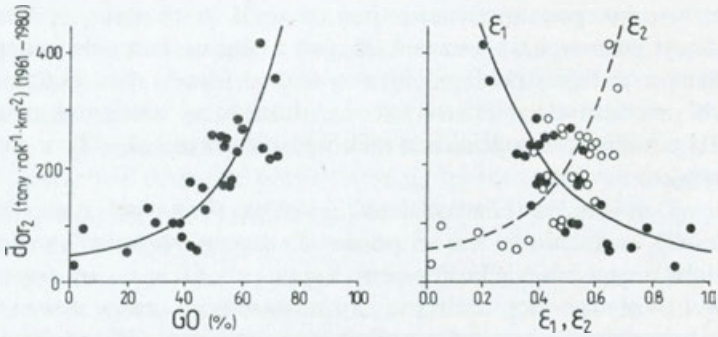
Porównanie współczynników zmienności C_{v1} i C_{v2} wskazuje na analogiczne do przypadku zmącenia prawidłowości, którym podlega transport zawiesiny w karpackim dorzeczu Wisły.

JEDNOSTKOWA DENUDACJA ODPŁYWOWA

Denudacja odpływowa $\bar{d}_{or2}$ w karpackiej części dorzecza Wisły wykazuje strefowe i zarazem piętrowe zróżnicowanie. Na nizinnym przedpolu Karpat nie przekracza 20 ton · rok^{-1} · km^{-2}, na Pogórzu Karpackim wynosi już 200-1000 ton · rok^{-1} · km^{-2}, we wschodniej części Beskidów, a także w Beskidzie Śląskim i Beskidzie Małym nie przekracza 90 ton · rok^{-1} · km^{-2}. W pozostałej części Beskidów oraz w kotlinach śródgórskich wynosi 150-270 ton · rok^{-1} · km^{-2}, jedynie w eksponowanych na południe i pozostających w głębokim cieniu opadowym zlewniach Czarnej Orawy i górnego Popradu nie przekracza 100 ton · rok^{-1} · km^{-2}. Bardzo zróżnicowana wartość denudacji odpływowej na obszarze Pogórza Karpackiego stanowi odzwierciedlenie różnej wielkości badanych zlewni, a także zróżnicowanej zdolności rzek do dalekiego transportu zawiesiny.

Wielkość denudacji odpływowej $\bar{d}_{or2}$ wykazuje ścisły związek z trzema parametrami zlewni, określającymi użytkowanie ziemi (ryc. 14). Zależności te wyjaśniają przestrzenne zróżnicowanie denudacji odpływowej. Zależność między denudacją odpływową a procentem powierzchni zlewni zajętym pod grunty orne GO w % wykazuje charakter paraboliczny. Potwierdza to pośrednio, że głównym źródłem dostawy materiału zawiesinowego do rzek są pogłębiane drogi polne. Nie mniej istotny wpływ na wielkość denudacji odpływowej w polskich Karpatach wywiera rozmieszczenie gruntów ornych w zlewni. To rozmieszczenie gruntów ornych charakteryzuje współczynnik rozwinięcia powierzchni gruntów ornych ε_2. Im rozmieszczenie gruntów ornych w zlewni staje się mniej korzystne (tzn. grunty orne obejmują

http://rcin.org.pl



Ryc. 14. Zależność między denudacją odpływową ($\bar{d}_{or2}$) w zlewniach polskich Karpat a procentem powierzchni zlewni zajętych pod grunty orne (GO – w % powierzchni zlewni), współczynnikiem rozwinięcia lesistości (ε_1) i współczynnikiem rozwinięcia powierzchni gruntów ornych w zlewniach (ε_2)

Relationship between the denudation due to runoff ($\bar{d}_{or2}$) in the Polish Carpathian catchments and percentage of the catchment area occupied by arable fields (GO – in % of catchment area), coefficient of the development of the forested area (ε_1) and coefficient of the development of the arable fields (ε_2) in catchments

coraz wyżej położone obszary w zlewni), tym zlewnia jest poddawana coraz większej denudacji odpływowej. Zależność pomiędzy $\bar{d}_{or2}$ i ε_2 ma charakter paraboliczny. Zależność między denudacją odpływową a współczynnikiem rozwinięcia lesistości w zlewni ε_1 jest natomiast typu hiperbolicznego. Wzrost zalesienia zlewni i coraz bardziej korzystne rozmieszczenie lasów w ich obrębie (wzrost zalesienia coraz wyżej wzniesionych obszarów w zlewni o większych nachyleniach i opadach) powoduje w efekcie szybkie zmniejszanie denudacji odpływowej w Karpatach.

Wieloletnia i sezonowa zmienność denudacji odpływowej jest analogiczna do zmienności transportowanych mas materiału zawiesinowego. Z tych powodów szczegółowa charakterystyka czasowej zmienności denudacji zostanie pominięta. Warto jednak zwrócić uwagę na przeciętne z wielolecia wartości denudacji osiągane w kolejnych miesiącach.

W grudniu i styczniu w zlewniach górskich denudacja w skali miesięcznej nie przekracza 2 ton·km^{-2}, a w zlewniach pogórskich 50 ton·km^{-2}. Warunki klimatyczne, w dużo mniejszym stopniu pozostałe komponenty środowiska geograficznego, a także działalność człowieka decydują, że denudacja jest mniejsza w styczniu; maleje ona również w kierunku wschodnim i wraz ze wzrostem wysokości npm. W lutym denudacja zwiększa się, równocześnie niwelują się różnice w profilu równoleżnikowym, zwiększają zaś w profilu wysokościowym. W marcu zaznacza się maksimum denudacji wywołanej roztopami (do 50 ton·km^{-2}), denudacja wyrównuje się przestrzennie (z wyjątkiem silnie zalesionych zlewni beskidzkich). W kwietniu i maju denudacja maleje ulegając dużemu wyrównaniu przestrzennemu, przy czym większe wartości osiąga nadal na Pogórzu Karpackim. W okresie letnim denudacja

http://rcin.org.pl

odpływowa w polskich Karpatach osiąga największe rozmiary, wzrasta również jej przestrzenne zróżnicowanie. W czerwcu i lipcu w zachodniej części Beskidów przekracza 50, a lokalnie nawet 100 ton · km^{-2}. W pozostałej części Beskidów jest dwukrotnie mniejsza. W sierpniu rozmiary denudacji odpływowej maleją, przy czym nadal są większe w zachodniej części obszaru. We wrześniu i listopadzie denudacja w całym obszarze na ogół nie osiąga 2 ton · km^{-2}, co stanowi minimum roczne. Jedynie w październiku zaznacza się niewielki wzrost denudacji.

WPŁYW WIELKOŚCI ZLEWNI NA TRANSPORT ZAWIESINY

Natężenie transportu zawiesiny w karpackich dopływach Wisły zwiększa się od odcinków źródłowych do ich wylotu z Pogórza, na przedpolu Karpat natężenie tego transportu natomiast maleje z biegiem rzek. Taki kierunek zmian wykazuje przeciętne zmącenie rzek $\bar{P}_{r2}$, nie tylko w skali rocznej, ale i miesięcznej. Potwierdza to również analiza zależności pomiędzy U_{max} i Q. Przedstawiony przebieg zmian w natężeniu transportu zawiesiny z biegiem badanych rzek stanowi potwierdzenie schematu podawanego przez innych autorów (Wiliams 1977; Walling, Webb 1983; Walling 1983). Przyczyną takiego kierunku zmian w natężeniu transportu zawiesiny w karpackich dopływach Wisły jest zaznaczający się z przyrostem powierzchni ich zlewni (tylko w obrębie Karpat) wzrost podatności erozyjnej pokryw zwietrzelinowo-glebowych, uzależniony od litologii, a przede wszystkim od użytkowania ziemi.

W innych rzekach karpackich przepływających przez peryferyjne intensywnie denudowane obszary gór sytuacja komplikuje się (Diaconu 1971; Łajczak 1988a, 1989a) i nie zawsze stanowi potwierdzenie prostej zależności między współczynnikiem DR a wielkością zlewni. Obliczenie denudacji odpływowej w dowolnym profilu rzeki z zależności $\bar{d}_o = f(A)$ dotyczącej nawet tej samej rzeki (Jansson 1982), może dać błędne wyniki również w Karpatach.

Brzeżna strefa Karpat, do której należy również Pogórze Karpackie, to obszar o największym nasileniu dostawy drobnych zwietrzelin do rzek. Natężenie transportu zawiesiny szybko maleje zarówno w górę rzek, jak i w dół ich biegu, licząc od tej strefy. Z tych powodów największym natężeniem transportu charakteryzują się te odcinki rzek karpackich, których powierzchnia zlewni wynosi od 10^3 do 10^4 km^2. W polskich Karpatach zlewnie te obejmują w całości Pogórze Karpackie.

Zależność między masą transportu $\bar{R}$ a powierzchnią zlewni jest podobna do przypadku zmącenia $\bar{P}$. Szybkość wzrostu lub spadku transportowanej masy zawiesiny z biegiem rzek jest jednak większa niż zmącenia. Spadek wartości $\bar{R}$ w nizinnych odcinkach rzek karpackich informuje o wzmożonej sedymentacji materiału zawiesinowego, która w dolinie górnej Wisły i dolnego Sanu osiąga na przedpolu Karpat wielokrotnie mniejsze rozmiary niż w dolinach innych rzek karpackich, np. Cisy, a zwłaszcza Seretu (Łajczak 1989a).

http://rcin.org.pl

Regulacja rzek karpackich, powodująca wzrost szybkości spływu wód i w efekcie erozję wgłębną koryt, zmniejsza rozmiary sedymentacji pozakorytowej. W tej sytuacji w nizinnych odcinkach rzek strefa wzmożonej sedymentacji materiału zawiesinowego oddala się od brzegu gór. Sytuację taką stwierdza się na przedpolu polskich Karpat. Prostowanie koryt rzecznych i obwałowywanie rzek w ich karpackich odcinkach wywołuje więc efekt w postaci wzrostu wartości współczynnika *DR*. Budowa zapór wodnych wywołuje natomiast zaburzenia w zależnościach pomiędzy *DR* i powierzchnią zlewni.

ODDZIAŁYWANIE ZBIORNIKÓW ZAPOROWYCH NA PRZEPŁYW ZAWIESINY

Przebieg zamulania zbiorników zaporowych w polskich Karpatach obejmuje 3 fazy, w których oddziaływanie zbiorników na przepływ zawiesiny w rzece jest odmienne (Łajczak 1986).

1. Zamulanie głębokiego zbiornika aż do zmniejszenia średniej głębokości do około 3–5 m, kiedy w następstwie wzmożonej sedymentacji materiału zawiesinowego i całego ładunku materiału dennego zachodzi redukcją początkowej pojemności zbiornika o co najmniej 80%. Zdolność zbiornika do trwałej retencji zawiesiny β spada do 0%. Czas trwania tej fazy zamulania zbiorników wynosi od ponad 200 do kilkunastu tysięcy lat (tab. 8) i zależy od początkowej pojemności zbiornika i wielkości dostawy materiału.

2. W czasie zamulania płytkiego lub wypłyconego głębokiego zbiornika zaporowego prądy wezbraniowe w zbiorniku łatwo osiągają strop osadów dennych; materiał zawiesinowy dostarczany do zbiorników przez rzeki nie może

Tabela 8

Szacunkowy czas trwania zamulania głębokich zbiorników zaporowych w karpackiej części dorzecza Wisły

Rzeka	Zbiornik zaporowy	Współczynnik zamulania β (w %) według:			Czas zamulania (w latach) 80 % początkowej pojemności zbiornika (V) na podstawie:		
		Brune'a	Hartunga	Drozda	$\Delta\bar{R}_{r1}$	$\Delta\bar{R}_{r2}$	ΔV
Dunajec	Rożnów[a]	84	90	86	670	320	260
San	Niewistka[c]	93	94	94	1800	430	380
Raba	Dobczyce[a]	95	97	96	1300	680	620
Soła	Tresna[a]	90	91	93	1200	680	620
Dunajec	Czorsztyn[b]	94	95	95	1700	810	710
Skawa	Świnna-Poręba[c]	94	96	95	2500	1100	1000
Czarny Dunajec	Kojsówka[c]	96	98	98	9600	9000	9000
San	Solina[a]	97	98	100	9600	8700	9000
Jasiołka	Dukla[c]	95	97	96	9600	9000	9000
Ropa	Klimkówka[b]	95	97	96	12000	11000	11000
Wisłoka	Krempna[c]	97	98	98	18000	17000	18000

Objaśnienia: ΔV – rzeczywisty początkowy przyrost objętości osadów dennych (ubytek pojemności zbiornika); $\bar{R}_{r1}$ – retencja zawiesiny w zbiorniku ustalona na podstawie parametru $\bar{R}$ obliczonego według obowiązujących zasad; $\bar{R}_{r2}$ – na podstawie metody zaproponowanej; zbiorniki zaporowe: a – funkcjonujące, b – w budowie, c – projektowane.

http://rcin.org.pl

już ulegać trwałemu zatrzymywaniu, lecz przepływa przez upusty w zaporze. Zatrzymywany jest tylko grubszy materiał denny. W szczególnych sytuacjach hydrologicznych zaznacza się jednak krótkotrwała znaczna sedymentacja materiału zawiesinowego i późniejsza wzmożona erozja osadów dennych. Transport zawiesiny w rzece poniżej zapory ulega wówczas zmniejszeniu lub zwiększeniu.

3. Zanik zbiornika, kiedy przy dużym współudziale roślinności nastąpi całkowite wypełnienie misy zbiornika osadami.

W badanym obszarze występują 3 zbiorniki zaporowe mające kontrolowany dopływ i odpływ zawiesiny (Rożnowskie, Czchowskie, Goczałkowickie). Reprezentują one dwie pierwsze fazy zamulania i w różnym stopniu wpływają na wielkość oraz wieloletnią i sezonową zmienność transportu zawiesiny w rzekach.

W głębokim dolinowym Jeziorze Rożnowskim wartość β wynosi obecnie około 90%, zmniejsza się ona systematycznie przy jednoczesnym wzroście wahań z roku na rok (zmiany do 5%). Odpływ zawiesiny ze zbiornika jest w efekcie dziesięciokrotnie zmniejszony i wyrównany w czasie, przy równoczesnym powolnym jego wzroście. W płytkim dolinowym Jeziorze Czchowskim, które charakteryzuje parametr $\beta = 0\%$, przebieg odpływu zawiesiny naśladuje przebieg jej dopływu. Jednakże w latach z wielkimi wezbraniami (intensywna erozja osadów dennych) odpływ zawiesiny ze zbiornika może w skali roku nawet 6,5 razy przewyższyć dostawę (np. w 1973 r.). W płytkim i rozległym przedgórskim Jeziorze Goczałkowickim, podobnie jak w Jeziorze Czchowskim, po okresie zamulania istnieją obecnie warunki do swobodnego przepływu zawiesiny. Także w tym zbiorniku zaznacza się tendencja do zwiększania częstotliwości lat z ujemnym bilansem zamulania, kiedy zaznacza się zwiększony odpływ zawiesiny w wyniku erozji osadów dennych. Proces ten zachodzi przy coraz mniejszych przepływach wezbraniowych. Jezioro Goczałkowickie wyróżnia duży udział falowania wody w erodowaniu osadów dennych.

Wymienione zbiorniki zaporowe wywierają także duży wpływ na sezonową zmienność transportu zawiesiny. Głębokie Jezioro Rożnowskie wpływa wyrównująco na przepływ zawiesiny. Jezioro Czchowskie zwiększa natomiast sezonową zmienność transportu w większym stopniu niż zmienność wieloletnią. Jest to spowodowane intensywnym erodowaniem osadów dennych i w efekcie zwielokrotnionym odpływem zawiesiny w lipcu, kiedy to podczas częstych wezbrań ulega częściowemu opróżnianiu Jezioro Rożnowskie (tworzenie rezerwy powodziowej). Jezioro Goczałkowickie zmniejsza natomiast sezonową zmienność transportu zawiesiny. Sedymentacja materiału zawiesinowego zachodzi w tym zbiorniku wiosną oraz latem; jesienią i zimą w wyniku dużego falowania wody jak też minimalnej dostawy zawiesiny następuje odpływ rumowiska ze zbiornika. W okresie funkcjonowania tego zbiornika zwiększa się liczba miesięcy w roku, w których przeważa odpływ zawiesiny nad dostawą. W Jeziorze Czchowskim natomiast liczba tych miesięcy w roku jest stała (Łajczak 1988b).

http://rcin.org.pl

Usytuowanie zbiorników zaporowych w różnych odcinkach rzek karpackich w dorzeczu Wisły powoduje, że redukcja transportu zawiesiny i w efekcie zmniejszenie jej dostawy do Wisły wynosi obecnie w Małej Wiśle – 0%, w Sanie – 10%, w Dunajcu – 55%, a w Sole aż 90%.

ZASTOSOWANIE METOD TAKSONOMICZNYCH W ANALIZIE PRZESTRZENNEGO ZRÓŻNICOWANIA TRANSPORTU

Przeprowadzona analiza pozwoliła w karpackiej części dorzecza Wisły wyróżnić 4 obszary o różnej wielkości denudacji odpływowej i zmącenia rzek. Są to:

– Kotliny Podkarpackie,
– Pogórze Karpackie,
– wschodnia część Beskidów (Bieszczady, Beskid Niski, Wyżyna Wańkowej),
– zachodnia część Beskidów wraz z kotlinami śródgórskimi.

Charakterystyka zmącenia rzek i denudacji odpływowej w zlewniach w tych obszarach została przeprowadzona we wcześniejszych rozdziałach.

Typy wieloletniej i sezonowej zmienności transportu zawiesiny i odpływu wody ustalono metodą różnic przeciętnych RP. Metoda ta pozwala wyróżnić grupy rzek o zbliżonym i odmiennym reżimie transportu i odpływu. Metoda podobieństw uwypukla odrębność reżimu hydrologicznego rzek zachodniej i wschodniej części polskich Karpat. Metoda różnic przeciętnych podkreśla natomiast wewnętrzną strukturę hydrologiczną obu obszarów.

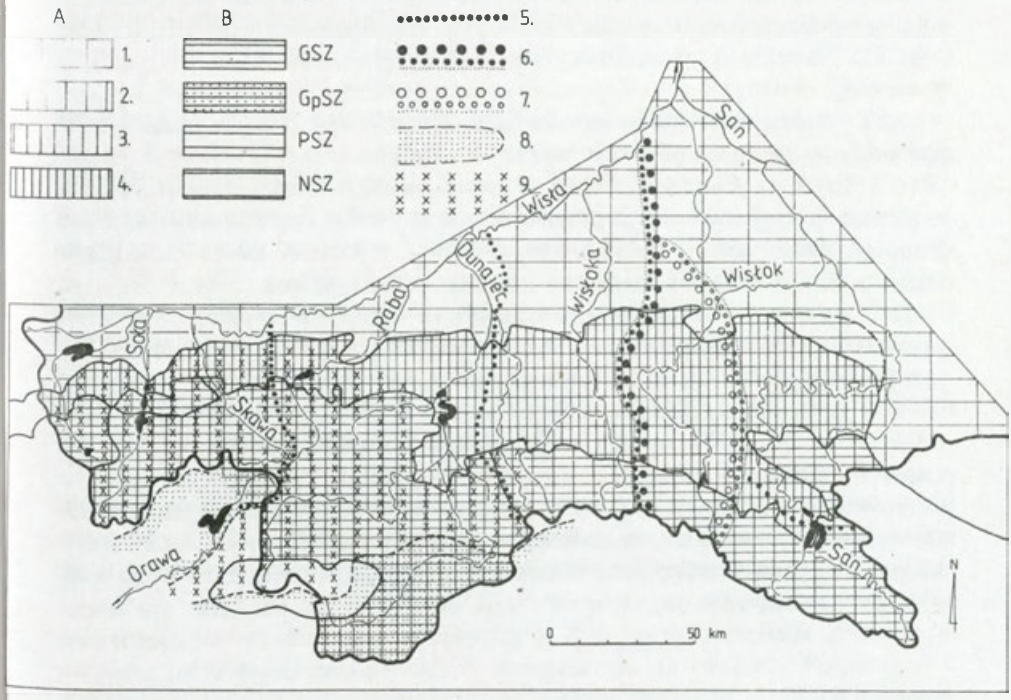
Przeprowadzone w tym celu obliczenia są analogiczne do omówionych wcześniej. W tym przypadku w każdej poszczególnej sytuacji analizowano jednak jeden (a nie dwa) parametr zmienny w czasie. W przypadku zmienności wieloletniej analizowano ilorazy średnich rocznych wartości $\bar{P}$, R, $\bar{Q}$ z kolejnych lat od 1961 r. do 1980 r. i przeciętnej rocznej wartości z wielolecia 1961 – 1980. W przypadku zmienności sezonowej analizowano ilorazy średnich miesięcznych wartości tych parametrów z wielolecia, przez wartości przeciętne roczne. Obliczone ilorazy zapisano w postaci macierzy $n \times m$, gdzie n to liczba rzędów odpowiadająca profilom pomiarowym, a m to liczba kolumn reprezentujących rozkład cechy taksonomicznej. Różnice przeciętne RP w przypadku każdej cechy taksonomicznej zostały obliczone między każdym z profilów pomiarowych a wszystkimi pozostałymi. Wyniki obliczeń uzyskano w postaci macierzy różnic przeciętnych. W numeracji profilów pomiarowych zachowano porządek hydrologiczny. Wartości RP wynoszą od 0,0 do ponad 1,0. Wartości zerowe biegnące wzdłuż przekątnej tabeli ilustrują absolutne podobieństwo czasowej zmienności parametru. Im wartość RP jest większa, tym podobieństwo jest mniejsze.

Skonstruowano diagram Czekanowskiego, który posłużył do oceny przestrzennej struktury czasowej zmienności parametrów P, R, Q. Duże podobieństwo czasowej zmienności parametru w sąsiednich rzekach zaznacza się

http://rcin.org.pl

w diagramie rozszerzeniem strefy o minimalnych wartościach *RP*. Obszary graniczne między większymi dorzeczami o odmiennym typie zmienności zaznaczają się natomiast w postaci zwężenia tej strefy. Na podstawie diagramu można również zanalizować podobieństwo cech odległych rzek, jak również zmiany wywoływane przez zbiorniki zaporowe. Możliwe jest więc wyróżnienie obszarów o różnym czasowym przebiegu odpływu wody i zawiesiny.

Analiza wieloletniej zmienności odpływu wody *Q*, zmącenia *P* oraz transportu *R* pozwoliła wyróżnić 6 grup rzek różniących się rytmem odpływu i transportu zawiesiny (ryc. 15). Najbardziej wyraźna strefa graniczna między grupami rzek biegnie między zlewnią Wisłoki oraz Sanu i obejmuje górną, a także środkową część zlewni Wisłoka. Po tę linię sięgają częste wezbrania



Ryc. 15. Regionalizacja transportu zawiesiny w polskich Karpatach i na nizinnym przedpolu

A – denudacja odpływowa (tony · rok^{-1} · km^{-2}): 1 – < 20, 2 – < 90, 3 – 150–270, 4 – 200–1000; B – sezonowa zmienność transportu (objaśnienia w tekście); 5 – granice dorzeczy różniących się wieloletnim przebiegiem odpływu wody i zawiesiny; 6 – wschodnia granica OWZ (objaśnienia w tekście); 7 – zachodnia granica KWZ (objaśnienia w tekście); 8 – obszary pozostające w cieniu opadowym wysokich pasm górskich, cechujące się mniejszym odpływem zawiesiny; 9 – obszar „ekranu opadowego" w polskich Karpatach

Regionalization of the suspended sediment transportation in the Polish Carpathians and on their lowlandic foreland

A – denudation due to runoff (tons · year^{-1} · km^{-2}): 1 – < 20, 2 – < 90, 3 – 150–270, 4 – 200–1000; B – seasonal variability of transportation (explanations in the text); 5 – borders of the catchments differing with respect to the multi-year pattern of the water and suspended sediment outflow, 6 – eastern border OWZ (explanations in the text); 7 – western border KWZ (explanations in the text); 8 – areas in the rain shadow of the high mountain ridges characterized by smaller suspended sediment outflow; 9 – area of the „precipitation screen" in the Polish Carpathians

http://rcin.org.pl

letnie, decydujące o rozmiarach odpływu rzek w zachodniej części polskich Karpat. Na wschód od tej linii wezbrania letnie są już rzadsze, duże rozmiary osiągają z kolei wezbrania roztopowe. Na tej podstawie wyróżniono oceaniczny (OWZ) i kontynentalny (KWZ) typ wieloletniej zmienności odpływu wody oraz zawiesiny w polskich Karpatach, jak też na ich przedpolu.

Użytkowane rolniczo zlewnie pogórskie wykazują, niezależnie od wzajemnej odległości, większe podobieństwo wieloletniej zmienności odpływu zawiesiny, aniżeli zalesione zlewnie beskidzkie. Efektem wylesiania Karpat i rolniczego użytkowania stoków jest wyraźna tendencja do upodabniania się wieloletniego rytmu odpływu materiału zawiesinowego w większych rzekach.

Analiza sezonowej zmienności odpływu wody i transportu zawiesiny pozwoliła wyróżnić 3 strefy, w których relacje kulminacji wiosennej roztopowej i letniej deszczowej odpływu wody i materiału zawiesinowego kształtują się odmiennie. Są to: Kotliny Podkarpackie, Pogórze Karpackie i Beskidy (ryc. 15). Na tej podstawie wyróżniono 3 typy sezonowej zmienności odpływu zawiesiny.

1. Typ górski (GSZ), gdzie udział miesięcznego (II, III, IV) odpływu zawiesiny w rocznym odpływie wynosi 9—30%, a w czasie miesięcy letnich (VI—VIII) — aż 40—84%. W tej grupie rzek wyróżniono podtyp (GpSZ) o zlewniach eksponowanych przeważnie na południe (Czarna Orawa, górny Poprad), gdzie udział miesięcznego odpływu zawiesiny podczas roztopów wzrasta do 16—30%, a w czasie miesięcy letnich wynosi tylko 60%.

2. Typ pogórski (PSZ), gdzie udział miesięcznego odpływu zawiesiny podczas roztopów wiosennych w rocznym transporcie tego materiału wynosi już 16—48%, a w czasie miesięcy letnich spada do 41—75%.

3. Typ nizinny (NSZ), w którym w miesiącach od lutego do kwietnia odpływa aż 50—53% rocznej masy materiału zawiesinowego, podczas gdy latem — tylko 33—39%.

Również w przypadku sezonowej zmienności odpływu zawiesiny zaznacza się wyraźna tendencja do upodabniania się rytmu odpływu zawiesiny ze zlewni karpackich, nawet odległych, w miarę zwiększającego się wylesiania i rolniczego użytkowania.

http://rcin.org.pl

PRZESTRZENNE ZRÓŻNICOWANIE EROZJI I SEDYMENTACJI WEZBRANIOWEJ W ŚWIETLE TRANSPORTU ZAWIESINY

W skali regionalnej polskich Karpat Pogórze Karpackie podlega szybszej denudacji niż Beskidy. We wschodniej części Karpat różnica denudacji odpływowej w obu obszarach jest ponad dziesięciokrotna, co wynika nie tylko z różnic w użytkowaniu ziemi, lecz także z różnic w podatności erozyjnej pokryw zwietrzelinowo-glebowych między Beskidami a Pogórzem. Denudacja w zachodniej części Karpat jest już bardziej wyrównana przestrzennie. Wyrównanie to wynika z niewielkiego obszaru, jaki zajmuje Pogórze, a także z większej jednorodności w strukturze użytkowania ziemi w zlewniach górskich. Denudacja odpływowa jest w tym obszarze ponad 3 razy większa niż we wschodniej części Beskidów i jednocześnie ponad 3 razy mniejsza niż na Pogórzu Karpackim. Szybsze tempo denudowania zachodniej części polskich Beskidów, pomimo bardziej odpornego podłoża, jest w dużym stopniu wywoływane większym natężeniem opadów deszczu i odpływu jednostkowego, zwłaszcza jego składowej powierzchniowej (obszar „ekranu opadowego"). Zlewnie położone w głębi Karpat w cieniu opadowym wysokich pasm górskich są już ponad 2 razy słabiej denudowane.

Większe rozmiary denudacji odpływowej na Pogórzu Karpackim wskazują na groźne rozmiary erozji w tym obszarze, co sygnalizowano w wielu opracowaniach. Różnice w natężeniu erozji pokryw zwietrzelinowo-glebowych na Pogórzu i w Beskidach są w rzeczywistości większe niż podane proporcje denudacji odpływowej. Wielkość strat w wodnym transporcie drobnych zwietrzelin, wyrażona przez współczynnik *DR*, jest w zlewniach górskich ze względu na większą energię rzeźby mniejsza niż na obszarze Pogórza.

Dotychczasowe badania wskazują na większe rozmiary denudacji mechanicznej w stosunku do denudacji chemicznej polskich Karpat (Figuła 1966). Denudacja chemiczna w małych zlewniach bądź w obrębie poletek na stokach fliszowych przekracza w tym obszarze 100 ton $\cdot$ rok^{-1} $\cdot$ km^{-2} (Froehlich 1975, 1982; Welc 1985). Udział nawożenia mineralnego i aerozoli spadających z opadem stanowi łącznie średnio 20% odpływu substancji chemicznych w rzekach. W świetle wyników uzyskanych zaproponowaną metodą obliczeniową można stwierdzić, że denudacja odpływowa w polskich Karpatach, obliczona tylko na podstawie odprowadzonych mas materiału zawiesinowego, jest średnio 3 razy większa od denudacji chemicznej. Badania procesów

http://rcin.org.pl

fluwialnych oraz analiza zamulania zbiorników zaporowych wskazują, że w karpackich dopływach Wisły zawiesina stanowi przeciętnie aż 85—95% całkowitego transportu mechanicznego (Cyberski 1969; Froehlich 1975, 1982; Łajczak 1986). W latach z dużymi wezbraniami odpływ zawiesiny ze zlewni beskidzkich może nawet 10 razy przekroczyć rozmiary odpływu substancji chemicznych. W latach suchych rozmiary całkowitego transportu fluwialnego wielokrotnie zmniejszają się, przy czym transport jonowy jest największy (Froehlich 1975, 1982). Podobne relacje w transporcie obserwuje się jeszcze w korycie środkowej Wisły. Przedstawione fakty wskazują na zdecydowaną przewagę mechanicznej denudacji polskich Karpat, przy czym litologia podłoża decyduje o transporcie produktów erozji głównie w postaci unoszonej. Jeśli przyjąć, że rozmiary strat w wodnym transporcie drobnych zwietrzelin w zlewniach są bardzo duże, większe na Pogórzu niż w Beskidach, to stosunek rzeczywistych rozmiarów erozji mechanicznej i chemicznej okaże się większy od podanego wyżej.

Zależność między denudacją odpływową a niektórymi wielkościami hydroklimatycznymi, z którymi można korelować odpływ zawiesiny (opady, wskaźnik odpływu), podlega w polskich Karpatach tym samym prawidłowościom, co w skali całego pasma Karpat (Łajczak 1988a, 1989a); (ryc. 16). Największą denudację stwierdza się w brzeżnych obszarach Karpat, gdzie opady i odpływ osiągają mniejsze rozmiary niż w obszarach wyżej wzniesionych. Denudacja odpływowa zmniejsza się szybko z wysokością npm. Zależność ta dowodzi, że dominujący wpływ na wielkość denudacji w Karpatach wywierają czynniki nieklimatyczne, spośród których litologia podłoża zlewni odgrywa główną rolę w obszarach zbudowanych z mało odpornych utworów. W obszarach karpackich o większej odporności podłoża główną rolę w zróżnicowaniu denudacji odgrywa już użytkowanie ziemi. Taka sytuacja istnieje w polskich Karpatach.

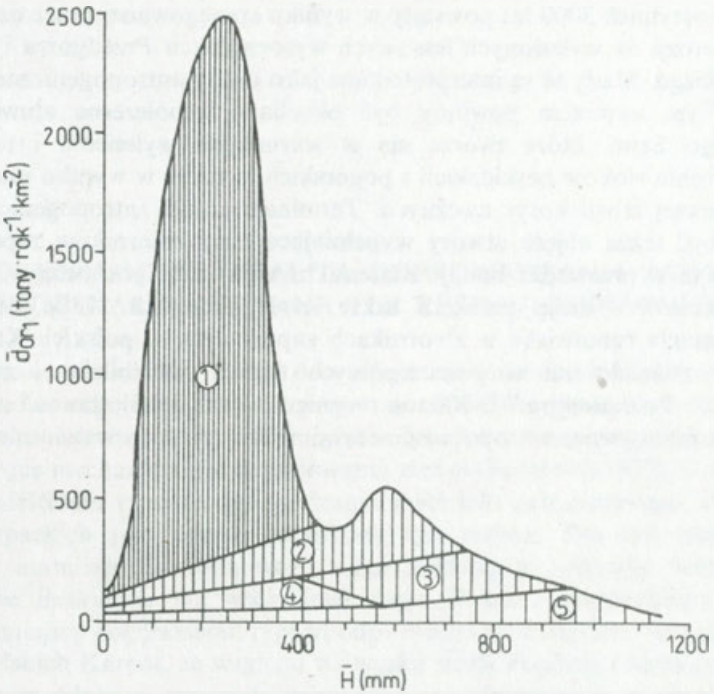
W warunkach zwiększonych przepływów wezbraniowych rzek karpackich, a także w warunkach lokalnego szybkiego pogłębiania ich koryt (Punzet 1981; Klimek 1987), w ostatnich stuleciach istnieją większe możliwości dalekiego odpływu zawiesiny z Karpat. Intensywna sedymentacja wezbraniowa zachodzi dopiero w dnach dolin w północnej części Kotliny Sandomierskiej, a zwłaszcza w przełomie Wisły przez Wyżyny Środkowopolskie. Wskazuje na to analiza największego w skali holocenu (Falkowski 1967) tempa współczesnego przyrostu mad w dolinie Wisły i Sanu (Buraczyński, Wojtanowicz 1966; Mycielska-Dowgiałło 1972; Szumański 1977).

Badane rzeki można podzielić na 4 grupy o zróżnicowanym natężeniu sedymentacji materiału zawiesinowego:

1. Zachodnie karpackie dopływy Wisły po Wisłokę włącznie. Ze względu na duże szybkości spływu wód wezbraniowych, umożliwiające daleki transport zawiesiny, dużą częstotliwość wezbrań letnich, a także pogłębianie koryt sedymentacja pozakorytowa zaznacza się tylko podczas dużych wezbrań.

2. Wisłok. Ze względu na mniejsze prędkości spływu wód w korycie,

http://rcin.org.pl



Ryc. 16 Zależność między wskaźnikiem odpływu ($\bar{H}$) a denudacją odpływową ($\bar{d}_{or1}$) w Karpatach
1 – Subkarpaty, 2 – Wyżyna Transylwańska, 3 – wewnętrzne Karpaty wulkaniczne, 4 – Pogórze Karpackie, 5 – pozostała część Karpat

Relationship between the runoff index ($\bar{H}$) and denudation due to runoff ($\bar{d}_{or1}$) in the Carpathians
1 – Subcarpathians, 2 – Transylvanian Upland, 3 – volcanic Inner Carpathians, 4 – Pogórze Karpackie (Carpathian Foothills), 5 – remaining part of the Carpathians

znaczna część materiału zawiesinowego, trudna do oszacowania, ulega sedymentacji.

3. San. Podobne przyczyny jak w przypadku Wisłoka oraz nieporównanie większe obciążenie rzeki materiałem zawiesinowym powodują, że materiał ten ulega wzmożonej sedymentacji. Natężenie sedymentacji wzrasta z biegiem rzeki.

4. Wisła. Natężenie sedymentacji materiału zawiesinowego zwiększa się z biegiem rzeki, osiągając roczną wartość nie mniejszą niż 7700 ton na 1 km biegu koryta rzeki w przełomie przez wyżyny.

Materiał zawiesinowy, dostarczany współcześnie do górnej Wisły, pochodzi w 90% z erozji zlewni i koryt rzecznych w Karpatach oraz na ich nizinnym przedpolu; 4% tej dostawy odbywa się za pośrednictwem Przemszy transportującej w przewadze pył węglowy pochodzący ze zrzutu wód kopalnianych. Mady Wisły zawierające pył węglowy określa się jako „mady przemysłowe" o łatwym do ustalenia wieku. Podobnie lessopodobne mady złożone w dolinie

http://rcin.org.pl

Sanu w ostatnich 3000 lat powstały w wyniku spotęgowanej przez działalność ludzką erozji na wylesionych lessowych wysoczyznach Przedgórza i Pogórza Karpackiego. Mady te są interpretowane jako osady antropogeniczne (Starkel 1960). Tym terminem powinny być określane współczesne aluwia Wisły i dolnego Sanu, które tworzą się w warunkach wylesienia i rolniczego użytkowania stoków beskidzkich i pogórskich, a także w wyniku intensywnej współczesnej erozji koryt rzecznych. Terminem „osad antropogeniczny" powinny być także objęte utwory wypełniające misy zbiorników zaporowych. Utwory te w przewadze buduje materiał zawiesinowy, pochodzący z linijnej erozji stoków – drogi polne, a także leśne (Froehlich 1982). Wzmożona sedymentacja rumowiska w zbiornikach zaporowych w polskich Karpatach, bardzo zróżnicowana w poszczególnych typach zbiorników i osiągająca w Jeziorze Rożnowskim 700 000 ton rocznie (Łajczak 1986), stanowi sumaryczny efekt intensywnej antropopresji w środowisku górskim w ostatnich latach.

http://rcin.org.pl

MORFODYNAMICZNA ANALIZA ODPROWADZANIA ZAWIESINY ZE ZLEWNI KARPACKICH NA TLE REŻIMU ODPŁYWU WODY

Przejściowość klimatu Polski decyduje o zmienności odpływu wody i odprowadzania materiału zawiesinowego ze zlewni karpackich w kolejnych latach. W wieloleciu typowe jest przeplatanie się lat o oceanicznym i kontynentalnym typie mechanicznego denudowania zlewni (Froehlich 1975). Dominującym w wieloleciu typem odprowadzania materiału zawiesinowego ze zlewni rzek karpackich jest jednak oceaniczny typ reżimu. Ten typ zmienności odpływu materiału zawiesinowego sięga najdalej w kierunku wschodnim w obrębie Beskidów. We wschodniej części Pogórza Karpackiego szybko ustępuje miejsca pogórskiemu typowi odprowadzania materiału. W zachodniej części polskich Karpat, ze względu na wąską strefę Pogórza i nizin przedgórskich, reżim odpływu materiału zawiesinowego uformowany w obrębie Beskidów jest zachowany jeszcze w ujściowych odcinkach dopływów Wisły.

Tylko w nizinnych i częściowo w pogórskich odcinkach rzek karpackich reżim odpływu wody oraz odprowadzania materiału zawiesinowego jest w ciągu roku podobny. Wskazuje to na duże możliwości erozyjne szybko spływających wód roztopowych z obszarów o niewielkich deniwelacjach. Zdolność erozyjna wód roztopowych w zlewniach górskich jest w wieloleciu na ogół niewielka, o czym decyduje stopniowe wytapianie pokrywy śnieżnej i powolne odmarzanie gruntu na stokach o zróżnicowanej ekspozycji.

Uzyskane wyniki potwierdzają stan dotychczasowych badań nad rolą wezbrań w rocznym odpływie materiału zawiesinowego ze zlewni karpackich. Zagadnienie denudacji fliszowych zlewni karpackich można praktycznie sprowadzić tylko do okresów wezbrań, szczególnie letnich, katastrofalnych. Wyniki obliczeń wskazują, co wcześniej wykazał W. Froehlich (1975), że teza M. G. Wolmana i J. P. Millera (1960) o przeobrażaniu rzeźby gór w warunkach klimatu umiarkowanego, głównie pod wpływem procesów sekularnych, jest w polskich Karpatach fliszowych nieobowiązująca.

Czas trwania okresów wezbraniowych w analizowanych rzekach wynosi przeciętnie 10—20% roku i zwiększa się z biegiem rzek. W długotrwałych okresach międzywezbraniowych zmącenie w beskidzkich odcinkach rzek spada poniżej 10 $g \cdot m^{-3}$; rośnie natomiast wraz z biegiem rzek. Szczególnie szybki w tych okresach przyrost zmącenia notowany jest na Pogórzu Karpackim. Podczas wezbrań przepływy rzek mogą wzrosnąć o 3 rzędy wielkości, zmącenie

http://rcin.org.pl

o 4 rzędy wielkości, unoszenie natomiast aż o 6 rzędów wielkości. Wartości te pośrednio informują o skali różnicy w natężeniu erozji w polskich Karpatach w okresach wezbrań i w okresach międzywezbraniowych. Wieloletnia i sezonowa zmienność odpływu wody, wyrażona przez współczynnik zmienności C_{v1} i C_{v2}, jest zdecydowanie mniejsza od zmienności zmącenia rzek, a zwłaszcza od zmienności odpływu zawiesiny.

Zróżnicowanie zmącenia rzek w okresach występowania fal wezbraniowych i w okresach międzywezbraniowych wskazuje, że procentowy udział odpływu materiału zawiesinowego podczas wezbrań w rocznym jego odpływie zmniejsza się z biegiem rzek. Rola procesów sekularnych, charakterystycznych w okresach międzywezbraniowych, jest więc największa na obszarze wylesionego i rolniczo użytkowanego Pogórza Karpackiego.

http://rcin.org.pl

KIERUNKI ZMIAN W NATĘŻENIU EROZJI I SEDYMENTACJI WEZBRANIOWEJ

Cechą współczesnej morfogenezy polskich Karpat, odmienną od dotychczasowego przebiegu procesów rzeźbotwórczych w holocenie, jest gwałtowny wzrost natężenia tych procesów, czego efektem jest przyspieszona denudacja. Przyczyną wzrostu natężenia procesów rzeźbotwórczych jest wylesienie Karpat, wprowadzenie upraw, pocięcie stoków siecią dróg polnych i leśnych. Gospodarczą rolę człowieka można przyrównać do roli okresu peryglacjalnego, w którym następowało wyprzątanie zwietrzelin ze stoków (Starkel 1977a).

Czynnikiem różnicującym natężenie odpływu materiału zawiesinowego ze zlewni w polskich Karpatach jest głównie powierzchnia zajęta pod grunty orne wraz z wciosami drogowymi. Obszary te są najbardziej narażone na erozję wodną powierzchniową. W warunkach współczesnej struktury użytkowania ziemi zaznaczają się w tym obszarze następujące zmiany w natężeniu oraz przebiegu odprowadzania materiału zawiesinowego ze zlewni wraz ze wzrostem ich wylesienia i ze wzrostem powierzchni zajętej pod grunty orne (a więc ze wzrostem ogólnej długości dróg polnych):

1. W zlewniach o coraz większej powierzchni zajętej pod grunty orne, bez względu na wysokość npm. i deniwelacje w ich obrębie, zaznacza się wyraźny wzrost odpływu materiału zawiesinowego we wszystkich miesiącach. Względne rozmiary tego wzrostu transportu są największe w miesiącach o niewielkim odpływie materiału (wrzesień – maj), a szczególnie podczas roztopów oraz wiosennych i jesiennych prac polowych. W zlewniach o dużym zalesieniu, pomimo dużego odpływu materiału zawiesinowego wzdłuż dróg leśnych, dostawa zwietrzelin do rzek jest znacznie zredukowana. Tylko zdarzenia hydrometeorologiczne o dużym natężeniu mogą w takich zlewniach w miesiącach od września do maja istotnie zwiększyć dostawę i w efekcie zwiększyć transport zawiesiny w rzekach. Częstotliwość takich zdarzeń jest jednak w tych miesiącach niewielka w porównaniu z okresem letnim. W zlewniach beskidzkich o dużej powierzchni gruntów ornych, szczególnie zaś w zlewniach pogórskich, gwałtowny wzrost dostawy produktów erozji do koryt rzecznych mogą już wywołać częstsze procesy o mniejszym natężeniu.

2. W silnie wylesionych i użytkowanych rolniczo zlewniach czasowy przebieg odpływu materiału zawiesinowego (w wieloleciu i w cyklu rocznym) jest bardziej wyrównany, aniżeli w zlewniach o dużym zalesieniu. Zmniejszanie

http://rcin.org.pl

czasowej zmienności odpływu materiału zawiesinowego ze zlewni o wzrastającej powierzchni z gruntami ornymi i coraz mniejszym zalesieniu stanowi efekt wzrostu wielkości jego odpływu w kolejnych miesiącach, szczególnie silnie zaznaczony w miesiącach pozaletnich. Analiza różnic przeciętnych *RP* wskazuje również, że wzrost powierzchni gruntów ornych w zlewniach karpackich, szczególnie zaś pogórskich, wywołuje efekt w postaci upodabniania się wieloletniego i sezonowego przebiegu odpływu zawiesiny nawet w odległych zlewniach.

3. Sezonowa zmienność natężenia procesów morfogenetycznych w zlewniach beskidzkich o dużym zalesieniu jest kształtowana głównie przez maksymalne natężenie opadu deszczu. Z kolei w wylesionych i rolniczo użytkowanych zlewniach karpackich przebieg natężenia tych procesów już nie odzwierciedla w prosty sposób przebiegu opadów i w dużym stopniu jest uzależniony od przebiegu prac polowych. Taki typ zmienności natężenia procesów morfogenetycznych w polskich Karpatach stanowi znaczną modyfikację układu naturalnego z okresu całkowitego zalesienia obszaru. Typ zmienności natężenia procesów morfogenetycznych zbliżony do naturalnego jest obecnie reprezentowany w polskich Karpatach przez zlewnie bieszczadzkie.

Przeprowadzona od początku ubiegłego stulecia regulacja rzek, a także eksploatacja aluwiów korytowych, wywołują istotne zmiany w przestrzennym zróżnicowaniu sedymentacji wezbraniowej materiału zawiesinowego. Przed okresem regulacji rzek główny obszar sedymentacji tego materiału stanowiła strefa wylotu rzek z Pogórza, a także pogórskie odcinki dolin. W obecnych warunkach zwiększonego przepływu wezbraniowego i szybko pogłębianych koryt rzecznych zachodzi daleki transport materiału zawiesinowego, który w większości dopływa do koryta Wisły. Współczesna strefa sedymentacji materiału zawiesinowego pochodzącego z erozji zlewni karpackich obejmuje dolinę Wisły i Sanu w północnej części Kotliny Sandomierskiej i w jeszcze większym stopniu przełomową dolinę Wisły przez Wyżyny Środkowopolskie.

Bardzo duże zmiany w dynamice den dolin karpackich, polegające na szybkim ich nadbudowywaniu lub na przemian nadbudowywaniu i erodowaniu, przypuszczalnie najszybsze w ich holoceńskiej ewolucji, wykazują zatopione odcinki dolin objęte cofką zbiorników zaporowych. Ten typ zmian dynamiki den dolin rzecznych ma jednak lokalny charakter, w przyszłości będzie jednak obejmować inne odcinki dolin karpackich.

http://rcin.org.pl

UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Znajomość natężenia transportu materiału zawiesinowego w rzekach karpackich pozwala pośrednio wnioskować o erozji w zlewniach górskich i pogórskich oraz o sedymentacji materiału na nizinnym przedpolu gór. Pomimo dużych strat w wodnym transporcie drobnych zwietrzelin, określanych przez współczynnik *DR* (*sediment delivery ratio*), możliwe jest wskazanie względnych różnic w natężeniu erozji między zlewniami w różnym stopniu zagrożonymi przez erozję.

O natężeniu erozji w zlewniach karpackich informuje przeciętne zmącenie rzek $\bar{P}$ oraz przeciętna wartość denudacji odpływowej $\bar{d}_o$. Wartości tych parametrów transportu zawiesiny wykazują w skali całego pasma Karpat podobne zróżnicowanie przestrzenne, które określają czynniki nieklimatyczne, spośród których najważniejszy to litologia podłoża zlewni. W obszarach Karpat o dużej podatności erozyjnej podłoża uwarunkowanej litologicznie (np. Subkarpaty, Wyżyna Transylwańska) wzrostowi transportu zawiesiny sprzyjają tektoniczne ruchy podnoszące, mobilność sejsmiczna, duża energia rzeźby, ruchy masowe.

Karpacka część dorzecza Wisły o dużym nasileniu antropopresji stanowi przykład obszaru o zwiększonym natężeniu erozji i odpływu zwietrzelin ze zlewni. Zatarty w warunkach współczesnej struktury użytkowania ziemi wpływ cech środowiska geograficznego na rozmiary erozji stoków i odpływ materiału zawiesinowego ze zlewni, jest najbardziej czytelny tylko w silnie zalesionych zlewniach bieszczadzkich, gdzie powierzchnia gruntów ornych jest bardzo mała. Karpacka część dorzecza Wisły reprezentuje tę część Karpat, gdzie w warunkach bardziej zwięzłego i odpornego na erozję podłoża, o podatności erozyjnej pokryw zwietrzelinowo-glebowych decyduje już użytkowanie ziemi.

Analiza współczesnej denudacji odpływowej w Karpatach wskazuje, że najsilniejszej erozji podlegają brzeżne partie tych gór. Wywołane jest to czynnikami geologiczno-morfologicznymi i pogłębiane gospodarczą presją człowieka. Denudacja odpływowa zmierza więc do podkreślania głównych kontrastów morfologicznych Karpat poprzez szybsze degradowanie niżej wzniesionych obszarów (peryferyjnych) o młodszym stopniu rozwoju rzeźby. Różnice w szybkości degradowania peryferyjnych i centralnych części gór są w polskiej części Karpat wielokrotnie mniejsze, aniżeli w pozostałej części pasma górskiego.

Natężenie transportu materiału zawiesinowego w polskich Karpatach

http://rcin.org.pl

zostało w ostatnich 200 latach spotęgowane w wyniku gospodarczej presji człowieka. Jest ono jednak nadal wielokrotnie mniejsze niż w najsilniej denudowanych obszarach Karpat.

Przeobrażanie rzeźby Karpat i nizinnego przedpola następuje przede wszystkim pod wpływem ekstremalnych zjawisk hydrometeorologicznych. Wpływ procesów sekularnych na modelowanie rzeźby obszaru jest minimalny, przy czym większe rozmiary osiąga w obszarach o dużej podatności erozyjnej, a bardzo małe w silnie zalesionych zlewniach o odpornym na erozję podłożu. Morfogenetyczną efektywność procesów ekstremalnych i sekularnych zwiększa wylesianie zlewni i ich rolnicze użytkowanie. W takich warunkach zaznacza się zwiększony i jednocześnie bardziej wyrównany w czasie odpływ materiału zawiesinowego w stosunku do bardziej zalesionych zlewni o niewielkiej powierzchni z gruntami ornymi pokrytymi siecią dróg polnych.

Wyrównana wieloletnia i sezonowa zmienność odpływu materiału zawiesinowego z pogórskiej części polskich Karpat, uwarunkowana wzrostem podatności erozyjnej w wyniku prawie całkowitego wylesienia obszaru i przeznaczenia go pod grunty orne, upodabnia ten obszar do szybko denudowanych części Karpat. Podobieństwo między tymi obszarami wyraża się także w zwiększonym morfogenetycznym znaczeniu procesów sekularnych.

Odprowadzanie rumowiska z Karpat na nizinne przedpole zostało w obecnych warunkach użytkowania ziemi i regulacji rzek (z wyjątkiem rzek ze zbiornikami zaporowymi) zwiększone oraz wyrównane w czasie. Takimi też zmianami cechuje się intensywna współczesna sedymentacja materiału zawiesinowego. Na przedpolu polskich Karpat główna strefa tej sedymentacji odsunęła się od brzegu gór i obejmuje dna dolin głównych rzek w północnej części Kotliny Oświęcimskiej i Kotliny Sandomierskiej, a przede wszystkim przełomową dolinę Wisły przez Wyżyny Środkowopolskie.

W warunkach całkowitego zalesienia zlewni karpackich głównym źródłem zasilania rzek w materiał zawiesinowy są erodowane koryta cieków. Jeżeli natomiast zlewnie są znacznie wylesione i rolniczo użytkowane, to funkcję tę przejmują linijnie rozcinane stoki. Równocześnie wzrasta dostawa zwietrzelin z intensywnie w takich warunkach przemodelowywanych koryt rzecznych.

Jednym ze skutków obecnej przyspieszonej denudacji Karpat jest szybkie zamulanie zbiorników zaporowych. Spośród różnych proponowanych metod przeciwdziałania temu procesowi radykalne skutki może przynieść tylko zmiana w strukturze i sposobie użytkowania ziemi. W odniesieniu do polskich Karpat coraz częściej postuluje się potrzebę wyeliminowania gruntów ornych na stromych stokach i zalesienie tych terenów, zmianę systemu zrywki drewna, likwidację części dróg polnych i leśnych oraz utwardzenie nawierzchni pozostałych. Zmiany takie, wywołujące wzrost odporności erozyjnej zlewni, dokonały się już częściowo w końcu lat czterdziestych we wschodniej części polskich Beskidów, przynosząc pozytywne efekty. Realizowana w Polsce, pomimo wieloletniej krytyki, koncepcja budowy dużych zbiorników zaporowych, głównie w środkowych i dolnych odcinkach dolin rzek karpackich, częściowo rozwiązuje problem wzmożonej dostawy rumowiska do koryta Wisły.

http://rcin.org.pl

LITERATURA

Biernat S., 1975, *Denudacja i transport rumowiska w dorzeczu Dunajca*, Biul. Inst. Geol., 289, ss. 79.

Brański J., 1967, *Dokładność punktowego pomiaru zmącenia wody*, Wiad. Służ. Hydrol. Met., 1, s. 19–30.

— 1968a, *Zmącenie wody i transport rumowiska unoszonego w rzekach polskich*, Prace Państ. Inst. Hydrol.-Met., 95, s. 49–67.

— 1968b, *Charakterystyka transportu rumowiska unoszonego w rzekach polskich*, Gosp. Wodna, 11, s. 415–418.

— 1975, *Ocena denudacji dorzecza Wisły na podstawie wyników pomiarów rumowiska unoszonego*, Prace Inst. Met. Gosp. Wodn., 6, s. 5–58.

— 1980, *Sediment run-off from the catchment area of the Carpathian rivers*, Acta Hydrobiol., Kraków, 1, s. 89–100.

Brański J., Skibiński J., 1968, *Udział rumowiska wleczonego w ogólnej masie rumowiska rzecznego transportowanego w korycie środkowej i dolnej Wisły*, Wiad. Służ. Hydrol. Met., 3–4, s. 13–23.

Brański J., Dąbkowski S. L., Skibiński J., 1980, *O aktualnym rozpoznaniu charakterystyk transportu rumowiska rzecznego na odcinku projektowanej kaskady Wisły górnej*, Gosp. Wodna, 3, s. 72–76.

Buraczyński J., Wojtanowicz J., 1966, *Rozwój doliny Wisły i Sanu w czwartorzędzie w północnej części Niziny Sandomierskiej*, Annls Univ. Mariae Curie-Skłodowska, ser. B, 21, 7, s. 143–184.

Chomiak T., Cyberski J., Mikulski Z., 1969, *Akumulacja rumowiska w zbiornikach retencyjnych*, Prace Państ. Inst. Hydrol.-Met., 96, s. 3–20.

Cyberski J., 1969, *Sedymentacja rumowiska w zbiorniku Różnowskim*, Prace Państ. Inst. Hydrol.-Met., 96, s. 21–42.

— 1984, *Zjawiska akumulacyjno-erozyjne w rzekach objętych oddziaływaniem budowli piętrzących*, Czas. Geogr., 3, s. 355–363.

Dębski K., 1959, *Próba oszacowania denudacji na obszarze Polski*, Prace i Studia Kom. Gosp. Wod., PAN Warszawa, 2, cz. 1.

Diaconu C., 1971, *Probleme ale scurgerii de aluviuni a rîurilor României*, Stud. de Hidrol., 31, ss. 307.

Einstein H. A., 1964, *Sedimentation – Part II River Sedimentation, Handbook of Applied Hydrology*, New York–San Francisco–Toronto–London.

Falkowski E., 1967, *Ewolucja holoceńskiej Wisły na odcinku Zawichost – Solec i inżyniersko-geologiczna prognoza jej dalszego rozwoju*, Z badań geol.-inż. w Polsce, 4, Biul. Inst. Geol., 198.

Figuła K., 1966, *Badania transportu rumowiska w ciekach górskich i pogórskich o różnej budowie geologicznej i użytkowaniu*, Wiad. Inst. Melior. Użyt. Ziel., 6, s. 131–145.

Fournier M. F., 1960, *Climat et érosion*, Presses Universitaires de France, Paris, ss. 201.

Froehlich W., 1975, *Dynamika transportu fluwialnego Kamienicy Nawojowskiej*, Prace Geogr., 114, ss. 122.

— 1978, *The role of land use in varying the suspended load during continuous rainfall (Kamienica catchment, flysch Carpathians)*, Geogr. Pol., 41, s. 27–37.

http://rcin.org.pl

— 1982, *Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryta w górskiej zlewni fliszowej*, Prace Geogr., 143, ss. 144.
— 1986, *Ekstrapolacja wskaźników denudacji w świetle mechanizmów erozji i transportu fluwialnego w zlewniach fliszowych Karpat*, Przegl. Geogr., 58, s. 89—98.
Froehlich W., Słupik J., 1980, *Drogi polne jako źródła dostawy wody i zwietrzelin do koryta cieku*, Zesz. Probl. Postęp. Nauk Roln., 235, s. 257—268.
— 1986, *Rola dróg w kształtowaniu spływu i erozji w karpackich zlewniach fliszowych*, Przegl. Geogr., 58, 1—2, s. 67—87.
Froehlich W., Starkel L., 1987, *Normal and extreme monsuoon rains — their role in the shaping of the Darjeeling Himalaya*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcan., 21, s. 129—160.
Gerlach T., 1976, *Współczesny rozwój stoków w polskich Karpatach fliszowych*, Prace Geogr., 122, ss. 116.
Gil E., 1976, *Spłukiwanie gleby na stokach fliszowych w rejonie Szymbarku*, Dokum. Geogr., 2, ss. 65.
Gładki H., 1978, *Badania ilościowe natężenia erozji na obszarze Karpat i Podkarpacia*, Materiały Konf. Teren. nt.: *Natężenie erozji gleb górskich na podstawie badań ruchu rumowiska*, Warszawa, s. 15—28.
— 1979, *Związek pomiędzy ilością materiału unoszonego a przepływem na obszarze karpackiego dorzecza Wisły*, [w:] *Studia i badania w zakresie budownictwa rolniczego i gospodarki wodnej w rolnictwie*, PAN, Kraków, s. 3—17.
Gładki H., Madeyski M., 1975, *Transport rumowiska w korycie rzeki Raby w przekroju Stróża i Proszówki*, Probl. Zagosp. Ziem Górskich, 14, s. 117—131.
Goreckaja Z. A., 1974, *Zakonomernosti raspredelenija stoka vzvešennych nanosov riek po territorri Ukrainy*, Trudy Ukr. Nauchno-Issled. gidromet., 127.
Holeman Y. N., 1968, *The sediment yield of the major rivers of the world*, Water Resour. Res., 4, s. 737—747.
Jansson M. B., 1982, *Land erosion by water in different climates*, Uppsala Univ., Dept. Phys. Geogr., UNGI Rapport Nr 57, ss. 151.
Jarocki W., 1957, *Ruch rumowiska w ciekach. Badanie oraz obliczanie ilości materiału wleczonego i unoszonego*, Wyd. Morskie, Gdynia, ss. 356.
Klimaszewski M., 1935, *Morfologiczne skutki powodzi w Małopolsce Zachodniej w lipcu 1934 roku*, Czas. Geogr., 13, s. 283—291.
Klimek K., 1974a, *The structure and mode of sedimentation of the floodplain deposit in the Wisłoka Valley*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcan., 8, s. 135—151.
— 1974b, *The retreat of alluvial river banks in the Wisłoka Valley*, Geogr. Pol., 28, s. 59—75.
— 1979, *Geomorfologiczne zróżnicowanie koryt karpackich dopływów Wisły*, Folia Geogr., ser. Geogr.-Phys., 12, s. 35—47.
— 1987, *Man's impact on fluvial processes in the Polish Western Carpathians*, Geogr. Annlr, 69 A, 1, s. 221—226.
Klimek K., Trafas K., 1972, *Young-Holocene changes in the course of the Dunajec river in the Beskid Sądecki Mts.*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcan., 6, s. 85—92.
Li Jian, Luo Defu, 1980, *The formation and characteristics of mudflow and flood in the mountain area of the Dachao Torrent and its prevention*, Interpraevent 1980 (II), Bad Ischl, s. 3—13.
Lwowicz M. I., 1979, *Zasoby wodne świata*, PWN, Warszawa, ss. 438.
Łajczak A., 1986, *Retencja rumowiska w zbiornikach zaporowych karpackiego dorzecza Wisły*, Czas. Geogr., 1, s. 47—77.
— 1988a, *Impact of various land use on the intensity of sediment runoff in the Polish Carpathians flysch catchments*, Interpraevent 1988 (III), Graz, s. 131—165.
— 1988b, *Suspended matter sedimentation*, [w:] *Development and structure of the Goczałkowice reservoir ecosystem*, Ekol. Pol., 3, (w druku).
— 1989a, *Współczesny transport i sedymentacja zawiesiny w rzekach karpackich*, Folia Geogr., ser. Geogr.-Phys. (w druku).

http://rcin.org.pl

— 1989b, *Wpływ wyboru metody pomiarów i obliczeń oraz okresu obserwacji na wartość uzyskanych miar transportu zawiesiny, na przykładzie rzek w polskich Karpatach*, Gosp. Wodna, 6, (w druku).

Madeyski M., 1976, *Związek między ilością rumowiska unoszonego i przepływem w falach powodziowych dla przekroju Proszówki na rzece Rabie*, Probl. Zagosp. Ziem Górskich, 17, s. 167—177.

— 1983, *An expression for suspended load transportation due to high discharge in small flysch river basins*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcan., 16, s. 131—141.

Maruszczak H., 1984a, *Spatial and temporal differentiation of fluvial sediment yield in the Vistula river basin*, Geogr. Pol., 50, s. 253—269.

— 1984b, *Zmienność natężenia denudacji mechanicznej dorzecza górnego Dunajca w świetle pomiarów hydrologicznych w dwudziestoleciu 1952—1971*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcan., 17, s. 53—68.

Mikulski Z., 1961, *Transport zawiesiny mineralnej w rzekach polskich*, Gosp. Wodna, 10, s. 461—462.

Mycielska-Dowgiałło E., 1972, *Rozwój doliny środkowej Wisły w holocenie w świetle badań z okolic Tarnobrzega*, Przegl. Geogr., 1, s. 73—83.

Nippes K. R., 1974, *A new method of computation of the suspended sediment load*, IAHS Publ., Symp. Mathem. Models Hydrol., Warszawa, 2, 101, s. 659—666.

Osuch B., 1978, *O ocenie ładunku materiału unoszonego w rzekach*, Mat. Konf. Teren. nt.: *Natężenie erozji gleb górskich na podstawie badań ruchu rumowiska*, Warszawa, s. 29—40.

Painter R. B., 1976, *Sediment*, [w:] Rodda J. C. (red.) *Facets of Hydrology*, London—New York—Sydney—Toronto, s. 163—176.

Pasławski Z., 1965, *Rozważania nad metodyką badań ilościowych unoszonego rumowiska rzecznego*, Wiad. Służ. Hydrol. Met., 1 (61), s. 77—89.

Prochal P., 1973, *Czynniki wpływające na natężenie zmywów i ruchu rumowiska w zlewni potoku Wierchomla Wielka*, Zesz. Probl. Postęp. Nauk Roln., 151, s. 31—48.

Punzet J., 1973, *Analiza przebiegu największych przepływów prawdopodobnych na Wiśle górnej*, Gosp. Wodna, 4, s. 125—129.

— 1975, *Odpływ średni w dorzeczu Wisły górnej*, Gosp. Wodna, 2, s. 45—49.

— 1981, *Zmiany w przebiegu stanów wody w dorzeczu górnej Wisły na przestrzeni 100 lat (1871—1970)*, Folia Geogr., ser. Geogr.-Phys., 14, s. 5—28.

Rango A., 1970, *Possible effects of precipitation modification on stream channel geometry and sediment yield*, Water Resour. Res., 6, s. 1765—1770.

Reniger A., 1959, *Zagadnienie erozji gleb w Polsce*, Prace i Studia Kom. Gosp. Wodn., PAN, Warszawa, 2, cz. 1.

Roehl J. W., 1962, *Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors*, IAHS Publ., 59, s. 202—213.

Schumm S. A., 1965, *Quaternary paleohydrology*, [w:] *The Quaternary of the United States*.

Słupik J., 1973, *Zróżnicowanie spływu powierzchniowego na fliszowych stokach górskich*, Dokum. Geogr., 2, ss. 118.

— 1986, *Ocena metod badań roli użytkowania ziemi w przebiegu spływu wody i erozji gleb w Karpatach*, Przegl. Geogr., 58, 1—2, s. 41—50.

Sobczak J., 1965, *Krzywe związków między wodostanem a masą transportowaną*, Zesz. Nauk. Politech. Krakow., 10, Budown. Wodne, 9, ss. 45.

— 1966, *Przyczynek do obliczania masy transportu rumowiska rzecznego przy zastosowaniu metod statystycznych*, Przegl. Geofiz., 1, s. 37—43.

Stachy J., 1984, *Odpływ rzek polskich w latach 1971—1980 na tle danych wieloletnich*, cz. I, Gosp. Wodna, 5, s. 138—141, cz. II, Gosp. Wodna, 6, s. 163—169.

Starkel L., 1960, *Rozwój rzeźby Karpat fliszowych w holocenie*, Prace Geogr., 22, ss. 239.

— 1972, *Karpaty Zewnętrzne, Kotlina Sandomierska*, [w:] *Geomorfologia Polski*, Polska Południowa, 1, s. 52—115, 138—166.

http://rcin.org.pl

— 1977a, *Paleogeografia holocenu*, Warszawa, ss. 362.
— 1977b, *Last Glacial and Holocene fluvial chronology in the Carpathian valleys*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcan., 11, s. 33—51.
— 1980, *Erozja gleby a gospodarka wodna w Karpatach*, Zesz. Probl. Postęp. Nauk Roln., 235, s. 103—118.
Strakhov N. M., 1967, *Principles of Lithogenesis*, 1, Oliver and Boyd, Edinburg and London.
Study of making master plan for land erosion and volcanic debris control in the area of Mt. Merapi, 1979, Progress Report, Japan International Cooperation Agency.
Szumański A., 1977, *Zmiany układu koryta dolnego Sanu w XIX i XX wieku oraz ich wpływ na morfogenezę tarasu łęgowego*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcan., 11, s. 139—153.
Tricart J., 1962, *Les discontinuités dans les phénoménes d'érosion*, IAHS Publ., 59.
Trimble S. W., 1977, *The fallacy of stream equilibrium in contemporary denudation studies*, Am. J. Sci., 277.
Walling D. E., 1983, *The sediment delivery problem*, J. Hydrology, 65, s. 209—237.
Walling D. E., Webb B. W., 1983, *Patterns of sediment yield*, [w:] Gregory K. J. (red.), *Background to Paleohydrology*, Chichester—New York—Brisbane—Toronto—Singapore, s. 69—100.
Wang Lixian i inni, 1980, *Application of regression analysis to the prediction of average annual yield of silt*, Interpraevent 1980 (II), Bad Ischl. s. 95—102.
Welc A., 1985, *Zmienność denudacji chemicznej w Karpatach fliszowych (na przykładzie zlewni Potoku Bystrzanka)*, Dokum. Geogr., 5, ss. 102.
Wiliams J. R., 1977, *Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models, Erosion and soil matter transport in inland waters*, IAHS, 122.
Wilson L., 1973, *Variations in mean annual sediment yield as a function of mean annual precipitation*, Am. J. Sci., 273 B, s. 335—349.
Wiśniewski B., 1969, *Zamulanie zbiorników wodnych w Polsce oraz próba jego prognozy na podstawie intensywności denudacji*, Archwm Hydrotech., 4, s. 481—504.
— 1972, *Ilość rumowiska unoszonego i wleczonego w rzekach polskich*, Gosp. Wodna, 10, s. 381—386.
Wolman M. G., Miller J. P., 1960, *Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes*, J. Geol., 68, s. 54—74.
Zmącenie i transport rumowiska unoszonego w rzekach polskich w okresie 1956—1965, 1972, Wyd. Kom. i Łączn., Warszawa.

http://rcin.org.pl

DIFFERENTIATION OF SUSPENDED MATTER TRANSPORTATION IN THE CARPATHIAN PART OF THE VISTULA CATCHMENT

Summary

Knowledge of the intensity and rhythm of the suspended matter outflow from the mountains which are built of deposits vulnerable to fast erosion enables one to infer indirectly about erosion in drainage basins and sedimentation on valley bottoms. Despite of large losses of weathered materials in water transportation, determined by the sediment delivery ratio DR, it is possible to indicate the relative differences in the intensity as well as in the process of erosion between the catchments which are subjected to erosion in various degrees. Such calculations have been performed for the entire Carpathian arc and for the lowlandic foreland of the mountains, with the Polish part of the Carpathians in the Vistula catchment particularly emphasized. The characteristics of the suspended matter transportation has been based on the records of turbidity and discharge of 168 gauging posts of the period of 1951 – 1980. Forty one posts of this type are located in the Polish Carpathians and at their foreland (Fig. 1, Tab. 1). The analyzed records allow to evaluate the role of lithology, uplifting, energy of relief, mass movements on slopes, climatic-hydrologic conditions, and first of all human impact on the contemporary differentiation of denudation due to runoff in the Carpathians.

The detail characteristics of the suspended load transportation in the Polish Carpathians and their foreland is based on the records of the period of 1961 – 1980. The performed characteristics of transportation in a balance approach required calculations of various parameters of transportation (turbidity P, maximum flux of suspended load during floods U_{max}, mass of transport R, unit denudation due to runoff d_o) as well as of the parameters of catchments or rivers (Tab. 2, 3).

The parameters of the suspended matter transportation in the Carpathian part of the Vistula catchment (as in the case of the entire Carpathians) have been calculated according to the method accepted by the State Hydrological Service and additionally according to the method proposed by the author. In both cases the calculations have been based on the same initial data (daily records of turbidity P and discharge Q of the multi-year period). The obtained results have been analyzed throughly indicating a larger accuracy of the method proposed. The evaluation was based on the analysis of corrective coefficient of silting of dam reservoirs "k_2" because of lack of any more precise norm. The values of the suspended sediment transportation calculated this way are twice as large as those calculated according to the accepted method (Fig. 3).

The calculation procedure of the suspended matter transportation according to the proposed method included calculations of duration of turbidity P' and suspended sediment flow U' (product of P' and Q) of the daily values of the multi-year period in the studied time intervals (successive months and years in the multi-year period) in the analyzed gauging profiles. The duration curves plotted in the Cartesian co-ordinates allow to calculate precisely the mean values of $\bar{P}'$ and $\bar{U}'$ in required time intervals (Fig. 2). The lacking values of daily turbidity have been completed by one of the six tested arithmetic methods of interpolation giving the smallest error of a known value and sign. The known value $\bar{U}'$ ($kg \cdot s^{-1}$), allows to calculate the mass of transportation R (tons) in:
– average year or in average months of the multi-year period

$$\bar{R} = 10^{-3} \cdot \bar{k}_1 \cdot \bar{U}' \cdot T$$

http://rcin.org.pl

— in successive years:

$$R = 10^{-3} \cdot k_1 \cdot \bar{U}' \cdot T,$$

where:

k_1 — corrective coefficient actual in a given year; $\bar{k}_1$ — weighted average of coefficient in the multi-year period; T — period expressed in seconds.

The value of turbidity $\bar{P}'$ ($g \cdot m^{-3}$) calculated from the duration curves has been also multiplied by the appropriate value of coefficient k_1. Unit denudation due to runoff in a catchment (tons · year^{-1} · km^{-2}, tons · month^{-1} · km^{-2}) is obtained by division of the difference of the multi-year average of outflow and inflow of suspended sediment from the catchment by the catchment area ($\Delta\bar{R}/A$).

The performed correlation of transportation parameters and parameters of the catchments and rivers has allowed to learn the causes of differentiated magnitude and intensity of suspended sediment transportation in rivers. The temporal variability of transportation has been characterized by the multi-year c_{v1} and seasonal c_{v2} variability coefficients. Owing to the application of the average differences (RP) method it has been possible to distinguish such dynamic parameters of the catchments and rivers which determine the temporal rhythm of the suspended sediment outflow best of all (Tab. 4).

Under the present-day management of the Carpathian part of the Vistula catchment there are favourable conditions for a distant outflow of suspended matter to the foreland of the mountains. Intensified sedimentation of that material initiates just in the northern part of the Sandomierz Basin (Tab. 5). The distant outflow of suspended matter out of the Carpathians facilitates the evaluation of denudation due to runoff in that area. The Carpathian tributaries supply 90% of suspended matter to the upper Vistula. In the case of lack of dam reservoirs on the Carpathian rivers that share has been estimated for 98%. The Carpathian tributaries dominantly influence the multi-year and seasonal variability of the suspended matter transportation in the upper and middle Vistula (Fig. 5, 6).

In the scale of the entire Carpathians the catchment vulnerability to erosion which affects the intensity of suspended matter transportation depends mainly on lithology of substratum and is largest in the Sub-Carpathians and in the Transylvanian Upland (Fig. 4). In the case of substratum which is more resistant to erosion deforestation and land use contribute to the catchment erodibility. Therefore, the parameters determining the land use (Fig. 7, 11, 14) influence most strongly the magnitude and intensity of suspended sediment transportation in the Polish Carpathians. The rapid increase in outflow of suspended matter as the land use is intensified and related to that increased surface runoff along the cart roads and forest tracks (Fig. 10) is of exponential form in each time interval. For example, the relation between the mean annual suspended matter outflow of the multi-year period of the catchments in the Polish Carpathians $\Delta\bar{R}$ and the area of arable fields in catchments GO (km^2) is as follows:

$$y = 173066\ x^{0.0446}, \quad r = 0.8232.$$

The analysis of the variability coefficients of river turbidity c_{v1} and c_{v2} and mass of suspended matter flowing through the gauging profiles has shown that the seasonal variability is larger than that of the multi-year period under the Carpathian conditions. That contrast in the variability of suspended matter outflow, typical of the mountains of the oceanic runoff regime, is larger than in the case of water runoff in the Carpathians. In the uplandic and lowlandic tributaries of the upper Vistula these relations are reverse. As the relative (%) and absolute (km^2) area of arable fields increases in the Carpathian catchments, the temporal pattern of the suspended matter outflow becomes more uniform, simultaneously showing a rapid increase (Fig. 8, 13).

The regionalization of the suspended matter transportation and that of river runoff, performed using the selected taxonomic methods, allows to distinguish the mountain-, foothill- and lowland types of seasonal variability of suspended matter outflow as well as oceanic and continental types of the multi-year variability in the studied area (Fig. 15).

http://rcin.org.pl

The differentiated influences of the dam reservoirs on the suspended matter flow in rivers, depending of the ability to durable capture of the river loads, have been shown (Tab. 6). Deep reservoirs, of large abilities to capture the river load ($\beta > 90\%$) moderate the suspended sediment flow in rivers and simultaneously reduce its flux. Shallow reservoirs (3–5 m at average), without ability to durable capture of suspended load, increase the temporal variability of the suspended sediment flow and actually do not reduce its flux in the annual scale.

Denudation due to runoff in the catchments and sedimentation on the valley bottoms exhibits a zonal as well as a vertical differentiation in the Polish Carpathians and at their foreland nowadays. Denudation due to runoff increases as the catchment area does and reaches the largest values in the Carpathian Foothills (200–1000 tons · year^{-1} · km^{-2}), and then diminishes rapidly to reach the value of 20 tons · year^{-1} · km^{-2} in the Sub-Carpathian Basins, It is larger in the western part of the Beskidy Mts. (150–270 tons · year^{-1} · km^{-2}) while in the eastern part it reaches only 90 tons · year^{-1} · km^{-2}. In the Polish Carpathians, as it is the case of the entire mountain arc, there is a propensity to emphasize the mani morphologic contrasts of the area. The differences in the denudation rates of the peripheries and central parts of the Carpathians are many times smaller in the Polish part than in the remaining areas (Fig. 16).

The intensity of the flood sedimentation increases downstream of the Carpathian rivers and reaches the largest values in the gap of the Vistula through the Middle Poland Uplands (over 7700 tons per 1 km of the river channel during a year). The intensity of the suspended matter sedimentation in the Vistula valley is 4 times smaller than in the Cisa valley and several times smaller than in the Seret valley.

Suspended matter outflow from the catchments of the Polish Carpathians exhibits periodicity corresponding to climatic seasons (Fig. 12). The seasonal pattern of the relative intensity of suspended sediment outflow depends largely on the intensity of the land use and related to it field practices. Therefore, there are significant differences between the strongly and weakly forested catchments (Fig. 9).

The analysis of the suspended matter transportation during the floods and during the inter-flood periods indicates that modelling of the Carpathian relief takes place mainly under the influence of extreme processes. The role of secular processes, although not significant, increases as the catchment area does and is the largest in the deforested and cultivated Carpathian Foothills.

The suspended load in rivers of the Polish Carpathians constitutes 85–95% of the total clastic material while the bedload only 5–15%. The magnitudes of suspended matter transportation calculated according to the proposed procedure are 3 times larger than the outflow of the material in the ionic form.

Under the conditions of strongly forested Carpathian catchments, the main sources of the supply of the suspended matter to rivers are the eroded river channels. In the case of intensive deforestation and agricultural land use that function is taken over by linearly dissected slopes with simultaneously increased supply of the weathered material to the river channels.

The increased present-day transportation of suspended matter in the Carpathian rivers cause a fast silting of dam reservoirs and intensified supply of material to the upper Vistula. The term "anthropogenic deposit" used for the sediments filling the reservoir basins and deposited on the Vistula flood terrace is well grounded.

The diminishing of the transportation of the suspended load in the Polish Carpathian rivers can be achieved by radical changes in the structure and type of the land use in the mountain and foothill catchments.

Translated by Teresa Mrozek

http://rcin.org.pl

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ТРАНСПОРТА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ В КАРПАТСКОЙ ЧАСТИ РЕЧНОГО ВОДОСБОРА ВИСЛЫ

Резюме

Знакомство интенсивности и ритма стока взвешенных наносов с гор построенных с образований податливых на быстрый размыв, позволяет косвенно заключать о эрозии в водосборных площадях и седиментации в днах долин. Несмотря на большие потери в водном транспорте дресвы, определяемые коэффициентом доставки взвешенных наносов (DR), возможно указать относительные разницы в интенсивности и ходе эрозии между водосборными площадями в различной степени подверженными эрозии. Такой расчёт проведено для всей дуги Карпат и их низменной предгорной территории, с особенным учётом польской части Карпат в речном водосборе Вислы. Характеристику транспорта взвешенных наносов проведено на основании результатов измерений мутности и течения в 168 измерительных постах в 1951 – 1980 гг. В польских Карпатах и их передгорьях находится 41 таких постов (рис. 1, табл. 1). Анализированные измерительные данные разрешают оценить роль литологии, поднимающих движений, энергии рельефа, гравитационных перемешений материала на склонах, климатогидрологических условий, а прежде всего активности человека в современной дифференциации отливной денудации в Карпатах.

Подробная характеристика транспорта взвешенных наносов в польских Карпатах и их предгорьях основана на измерительных данных с 1961 – 1980 гг. Проведенная характеристика транспорта в балансовом виде требовала подсчёта различных параметров переноса/мутность P, максимальный секундный полый перенос, U_{max} масса переноса R, единичная отливная денудация d_o, параметров водосборной площади и рек (табл. 2, 3).

Параметры транспорта взвешенных наносов в карпатском речном водосборе Вислы рассчитано на основании обязывающего в государственной гидрологической службе принципа (похоже в случае всех Карпат), а также добавочно на основании метода предложенного автором. В обеих случаях мы основывались на тех же исходных данных (результаты ежедневных измерений мутности P и течения Q с многолетия). Полученные результаты подвергнуто критическому анализу, получая большую точность данных предложенным методом. Основой этой оценки был, из-за отсутствия более точных образцов, анализ коэффициента поправочного заиливания водохранилищ „k_2". Так подсчитанные значения переноса взвешенных наносов являются в среднем два раза большими от подсчитанных обязывающим методом (рис. 3).

Ход подсчёта переноса величины взвешенных наносов по предложенному методу охватывал подсчёт продолжительности времени мутности P' и уноса U' (произведение P и Q) с ежедневных значений с многолетия в исследованных интервалах времени (очередные месяцы и годы в многолетии) в очередных анализированных измерительных профилях. Начерченные в декартовой системе кривые продолжительности времени разрешили точно подсчитать значения средних $\bar{P}'$ и $\bar{U}'$ в требуемых интервалах времени (рис. 2). Не хватающие ежедневные значения мутности раньше дополнено одним из шести тестированных арифметических методов интерполяции, дающих минимальную ошибку

http://rcin.org.pl

известной величины и знака. Известное значение $\bar{U}'$ (кг · сек$^{-1}$) разрешает подсчитать массу переноса R (тонны)в:

— среднем году или среднем месяце в многолетии:

$$\bar{R} = 10^{-3} \cdot \bar{k}_1 \cdot \bar{U}' \cdot T$$

— очередных годах многолетия:

$$R = 10^{-3} \cdot k_1 \cdot \bar{U}' \cdot T$$

где: k_1 — поправочный коэффициент актуалный в данном году; $\bar{k}_1$ — среднее взвешенное значение коэффициента в многолетии; T — период выраженный в (сек.).

Величину мутности $\bar{P}$(г · м$^{-3}$) подсчитанную с кривых продолжительности времени также умножено на соответственную величину k_1. Единичная отливная денудация в водосборной площади d_o (тонны · год$^{-1}$ · км$^{-2}$, тонны · месяц$^{-1}$ · км$^{-2}$) получается путём деления средней с многолетия разницы стока и притока взвешенных наносов с водосборной площади через её площадь ($\Delta\bar{R}/A$).

Проведенная корреляция параметров транспорта, параметров водосборной площади и рек, разрешила узнать причины неоднородной величины и интенсивности переноса взвешенных наносов в реках. Временную изменчивость переноса схарактеризовано при помощи коэффициента многолетней изменчивости C_{v1} и сезонной C_{v2}. Применение метода средних разниц RP позволило выделить динамические параметры водосборной площади и рек, которые в найбольшей степени определяют временный ритм стока взвешенных наносов (табл. 4).

В современных условиях освоения карпатской части речного водосбора Вислы взвешенные наносы имеют благоприятные условия к стоку на далёкое расстояние к предгорью. Усиленное осадкообразование этого материала начинается лишь в северной части Сандомерской котловины (табл. 5). Далёкий отлив взвешенных наносов с Карпат облегчает оценку стоковой денудации этой территории. Карпатские притоки в настоящее время доставляют 90% взвешенных наносов в верхнее течение Вислы. В результате отсутствия водохранилищ на карпатских реках эту долю оценено на 98%. Карпатские притоки решительно влияют также на многолетнюю и сезонную изменчивость переноса взвешенных наносов в верхнем а также в среднем течении Вислы (рис. 5, 6).

В масштабе всех Карпат эрозионная податливость водосборной площади, которая влияет на интенсивность переноса взвешенных наносов, зависит главным образом от литологии основания водосборной площади и является наибольшей в Субкарпатах и на Трансильванской возвышенности (рис. 4). В условиях более устойчивого основания на эрозию эрозионную податливость водосборной площади резко увеличивает её обезлесение и аграрное использование. Поэтому в польских Карпатах наибольшее влияние на величину и интенсивность переноса взвешенных наносов оказывают параметры определяющие землепользование (рис. 7, 11, 14). Быстрый рост стока взвешенных наносов с ростом интенсивности землепользования в водосборных площадях и связанного с этим роста поверхностного стока вдоль полевых и лесных дорог (рис. 10), обнаруживает степенной характер в каждом временном интервале. Например зависимость между средним годичным с многолетия стоком взвешенных наносов $\Delta\bar{R}$ с водосборной площади в польских Карпатах и поверхносью пахотных угодий в водосборных площадях GO (кв. км), принимает следующий вид:

$$y = 173066\ x^{0,0446}, \quad r = 0{,}8232.$$

Анализ коэффициента изменчивости C_{v1} и C_{v2} мутности рек а также массы взвешенных наносов проплывающих через измерительные профили доказал, что в карпатских условиях сезонная изменчивость является большей, чем многолетняя изменчивость. Этот контраст в изменчивости стока взвешенных наносов, типичный для гор в океаническом типе режима стока, является в Карпатах большим, чем в случае стока воды. В нагорных и изменных

http://rcin.org.pl

притоках верхнего течения Вислы эти связи являются обратными. С ростом относительной (%) и абсолютной (кв. км) поверхности пахотных угодий в карпатских водосборных площадях, временный ход стока взвешенных наносов является всё больше уравновешенный, одновременно проявляя быстрый рост (рис. 8, 13).

Проведенное с применением выбранных таксономических методов районирование переноса взвешенных наносов и речного отлива позволило выделить на исследованной територии горный, предгорный и изменный тип сезонной изменности стока взвешенных наносов, а также океанический и континентальный тип многолетней изменчивости (рис. 15).

Доказано неоднородный способ воздействия водохранилищ на расход взвешенных наносов в реках, зависимый от возможности устойчивого задерживания взвешенных наносов (табл. 6). Глубокие водохранилища с большой способностью задерживания взвешенных наносов ($\beta > 90\%$) выравнивают течение взвешенных наносов в реках и одновременно многократно редуцируют их течение. Мелкие водохранилища (в среднем до 3–5 м) с нулевой способностью устойчивого задерживания взвешенных наносов увеличивают временную изменчивость течения взвешенных наносов и в настоящее время не редуцируют их течения в годичном масштабе.

Отливная денудация в водосборных площадях и седиментация в днах долин в настоящее время обнаруживает в польских Карпатах и в их предгорьи зональную и одновременно этажную дифференциацию. Отливная денудация увеличивается с приростом поверхности водосборной площади и наибольших величин достигает на Карпатской возвышенности (200–1000 тонн·год$^{-1}$·км$^{-2}$), чтобы затем быстро уменьшаться и в Подкарпатских котловинах достигнуть величины 20 тонн·год$^{-1}$·км$^{-2}$. В западной части польских Бескидов достигает 150–270 тонн·год$^{-1}$·км$^{-2}$, в восточной части только 90 тонн·год$^{-1}$·км$^{-2}$. В польских Карпатах похоже как во всей цепи этих гор, обозначается стремление к подчёркиванию главных морфологических контрастов территории. Разницы в скорости денудирования окраинных и центральных частей Карпат являются в польской их части многократно меньшими, чем в остальной их территории (рис. 16).

Усиление паводковой седиментации увеличивается по течению карпатских рек и наибольших величин достигает в переломе Вислы через Среднепольские возвышенности (более 7700 тонн на 1 км хода русла реки в году). Интенсивность седиментации взвешенных наносов в долине Вислы в среднем 4-кратно слабее, чем в долине Тиссы и более 10-кратно слабее, чем в долине Серета.

Сток взвешенных наносов с водосборной площади в польских Карпатах обнаруживает сезонную цикличность навязывающую к климатическим временам года (рис. 12). Сезонный ход относительной интенсивности стока взвешенных наносов является, однако, в большой степени зависимым от интенсивности аграрного пользования водосборной площади и связанного с этим хода нолевых работ. Поэтому обнаруживает большие разницы между водосборными площадями с болшим и малым облесением (рис. 9).

Анализ переноса взвешенных наносов в паводковых периодах и в периодах между паводками доказывает, что моделирование рельефа Карпат происходит, рлавным образом, под влиянием крайних процессов. Роль секулярных процессов, хотя небольшая, увеличивается с приростом поверхности водосборной площади и является наибольшей на обезлесенной и аграрно использованной Карпатской возвышенности.

Взвешенные наносы в реках польских Карпат составляют в среднем 85–95% переноса кластического материала, а донного материала лишь 5–15%. Подсчитанные согласно предложенному методу величины переноса взвешенных наносов являются 3-кратно большими от стока ионного материала.

В условиях большого облесения карпатских водосборных площадей главным источником питания рек в взвешенные наносы являются эродированные русла водотоков. При большом обезлесении и аграрном пользовании водосборной площади эту функцию

http://rcin.org.pl

принимают линейно разрезываемые склоны при одновременном росте доставки дресвы из речных русел.

Увеличенный современный перенос взвешенных наносов в карпатских реках вызывает быстрое заливание водохранилищ а также увеличенную поставку россыпей в вепхнее течение Вислы. Определение отложений наполняющих чаши этих бассейнов и складываемых на пойменной террасе Вислы как „антропогенные отложения" является обоснованным.

Ограничение размеров транспорта взвешенных наносов в реках польских Карпат может произойти только в условиях резких изменений в структуре и способе успользования земли в горных и возвышенных водосборных площадях.

Перевёл Т. Казьмерчак

http://rcin.org.pl

http://rcin.org.pl

http://rcin.org.pl

http://rcin.org.pl

WYDAWNICTWA IGiPZ PAN
VARIA

Bibliografia geografii polskiej 1983. 1987, s. 428, zł 1200,–

Streszczenia prac habilitacyjnych i doktorskich 1984, 1985. 1986, s. 111, zł 250,–

Centralny katalog zbiorów kartograficznych w Polsce

zeszyt 5. **Wieloarkuszowe mapy topograficzne Polski 1576–1870**, 1984, cz. 1 s. 109, cz. 2 tab. 220, zł. 3500,–

Katalog dawnych map Rzeczypospolitej Polskiej w kolekcji Emeryka Hutten-Czapskiego i w innych zbiorach. Oprac. W. Kret, 1978, s. 164, 37 map, zł 140,–;

t. II, **Mapy XVIII wieku**. Oprac. T. Paćko, D. Stachnal-Talanda, E. Gołąb (w druku)

http://rcin.org.pl

Cena w prenumeracie zł 180,–
Cena zł 3400,–

WYKAZ ZESZYTÓW DOKUMENTACJI GEOGRAFICZNEJ

za ostatnie lata

1987

1 A. WERWICKI – **Geografia usług makroregionu funkcjonalnego Warszawy**, s. 93, zł 90,–
2 K. PUCHALSKI – **Atrakcyjność społeczno-gospodarcza jako czynnik rozwoju miasta (na przykładzie miast regionu Warszawy)**, s. 92, zł 90,–
3 A. BREYMEYER (red.) – **Lasy iglaste na obszarze Polski**, s. 111, zł 90,–
4 S. ŻUREK – **Złoża torfowe Polski na tle stref torfowych Europy**, s. 84, zł 90,–
5 M. KUPISZEWSKI – **Pomiar migracji w prognozowaniu i modelowaniu zmian rozmieszczenia struktury ludności**, s. 78, zł 90,–
6 J. DĘBSKI – **Założenia i realizacja planu przestrzennego zagospodarowania Polski w latach 1971–1985**, s. 92, zł 90,–

1988

1 H. LIBURA – **Badania wyobrażeń geograficznych na przykładzie mieszkańców Sanoka**, s. 90, zł 100,–
2-3 J. KOSTROWICKI (red.) – **Wybrane zagadnienia z geografii rolnictwa**, s. 103, zł 200,–
4 I. DYNOWSKA (red.) – **Antropogeniczne uwarunkowania zmian odpływu i reżimu rzek - w różnych regionach Polski**, s. 95, zł 100,–
5-6 L. KASPRZAK – **Dyferencjacja mechanizmów formowania stref marginalnych faz leszczyńskiej i poznańskiej ostatniego zlodowacenia na Nizinie Wielkopolskiej**, s.159, zł 200,–

1989

1 J. MALCZEWSKI – **Przestrzenna organizacja systemu placówek podstawowej ochrony zdrowia (na przykładzie dzielnicy Warszawa-Wola)**, s. 98, zł 130,–
2 M. BARTNICKA – **Wyobrażenia przestrzeni miejskiej Warszawy (studium geografii percepcji)**, s. 92. zł 130,–
3-4 Z. ZWOLIŃSKI – **Geomorficzne dostosowywanie się koryta Parsęty do aktualnego reżimu rzecznego** (w druku)
5 A. ŁAJCZAK – **Zróżnicowanie transportu zawiesiny w karpackiej części dorzecza Wisły**, s. 85, zł 130,–
6 P. JOKIEL, K. KOŻUCHOWSKI – **Zmiany wybranych charakterystyk hydroklimatycznych Polski w bieżącym stuleciu** (w druku)

http://rcin.org.pl