

ADAM BARTNIK • PAWEŁ JOKIEL



Geografia wezbrań i powodzi rzecznych



WYDAWNICTWO
UNIwersYTETU
ŁÓDZKIEGO

ADAM BARTNIK • PAWEŁ JOKIEL

Geografia wezbrań i powodzi rzecznych



WYDAWNICTWO
UNIwersytetu
ŁÓDZKIEGO

ŁÓDŹ 2012

Adam Bartnik, Paweł Jokieli – Katedra Hydrologii i Gospodarki Wodnej
Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki, 90-139 Łódź, ul. Narutowicza 88

RECENZENT

Elżbieta Bajkiewicz-Grabowska

REDAKTOR WYDAWNICTWA UŁ

Małgorzata Szymańska

SKŁAD I ŁAMANIE

ESUS – Agnieszka Buszewska

OKŁADKĘ PROJEKTOWAŁA

Barbara Grzejszczak

© Copyright by Uniwersytet Łódzki – Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego 2012

Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego

90-131 Łódź, ul. Lindleya 8

Wydanie I. Ark. druk. 16,5

Zam. 5069/2012. Cena zł 56,- + VAT

ISBN 978-83-7525-716-8

*Woda jest bardzo dobrym sługą,
ale okrutnym panem*
William Bullein (1562)

Spis treści

Jednemu daje, drugiemu bierze...	7
Nie wszystko płynie	13
O ekstremach można by w nieskończoność	29
Woda pasuje do kwadratowego i do okrągłego naczynia	37
Wezbrania i ich kulminacje	37
Maksymalne odpływy jednostkowe	45
Indeksy powodziowości Françoù–Rodiera	50
Indeksy wysokiej wody	52
Powodzie, ich przyczyny i skutki	54
Jaka piękna katastrofa	59
Nam też się „powodzi”	83
Niepewne dane o pewnych zdarzeniach	99
Tam gdzie rzeki płyną na wschód	109
Warunki formowania się wezbrań	109
Przepływy i odpływy maksymalne	113
Indeksy powodziowości i wysokiej wody	117
Kontynent „mokrych” konfliktów	123
Warunki formowania się wezbrań	123
Przepływy i odpływy maksymalne	128
Indeksy powodziowości i wysokiej wody	132
Ziemia, z której eukaliptusy wypłyły całą wodę	137
Warunki formowania się wezbrań	137
Przepływy i odpływy maksymalne	141
Indeksy powodziowości i wysokiej wody	145
Dwa łyki Ameryki	149
Warunki formowania się wezbrań	149
Przepływy i odpływy maksymalne	153
Indeksy powodziowości i wysokiej wody	158
Gdzie rzeki są wielkie i święte	163
Warunki formowania się wezbrań	163
Przepływy i odpływy maksymalne	170
Indeksy powodziowości i wysokiej wody	175
Półwysep ciemnych wód	179
Warunki formowania się wezbrań	179
Przepływy i odpływy maksymalne	185
Indeksy powodziowości i wysokiej wody	190
Jak dwie krople wody?	195
Co na to podręczniki?	195
Przepływy maksymalne i krzywe obwiedni	197

Maksymalne odpływy jednostkowe na świecie i ich zróżnicowanie przestrzenne	203
Powodziowość rzek świata w ujęciu przestrzennym i sezonowym	206
Dynamika zmian indeksu wysokiej wody na świecie	212
Dla szczególnie zainteresowanych... ..	215
Gdyby Wisła nie topiła, to Polka by po złocie chodziła	221
Warunki formowania się wezbrań	221
Przepływy i odpływy maksymalne	228
Indeksy powodziowości	235
Indeksy wysokiej wody	238
Kilka uwag o zróżnicowaniu przestrzennym	240
Miej usta mokre, ale nogi suche	247
Bibliografia	251
Spis rysunków i tabel	259

Jednemu daje, drugiemu bierze...

Cztery żywioły niemal od zawsze skupiały uwagę człowieka. W mniemaniu starożytnych filozofów, ich pomieszanie doprowadziło do powstania swoistej harmonii realnego świata jednoczącej w sobie przeciwstawne elementy. Twórcza koincydencja w przestrzeni żywiołów: ognia, powietrza, wody i ziemi przyniosła też fenomen życia i zdaje się stale podtrzymywać wszelką aktywność, jaka mu towarzyszy. Już starożytni zdawali sobie sprawę, że pytanie o to, który z żywiołów jest starszy, ważniejszy, silniejszy czy bardziej pożyteczny, jest źle postawione. Są one bowiem tyleż różne, co równe sobie. Jednocześnie specyfika każdego żywiołu leży w tym, że mogą one być zarówno siłami twórczymi, jak i niszczącymi. Od tego czy uda nam się prawidłowo wykorzystać pierwsze, a okiełznać lub przynajmniej ograniczyć te drugie, zależy zarówno poziom naszego dobrobytu i rozwoju cywilizacyjnego, jak i bezpieczeństwo nas wszystkich i każdego z osobna.

Woda jest dobrem powszechnym, które w równym stopniu może służyć przyrodzie, człowiekowi i społeczeństwu. Dobrem, którego znaczenia w rozwoju cywilizacyjnym świata nie sposób właściwie przecenić. Jej rozmieszczenie na Ziemi jest jednak wysoce nierównomierne i to zarówno w czasie, jak i w przestrzeni. Ta ogromna zmienność czasowa i duże zróżnicowanie przestrzenne żywiołu wodnego jest dziś przyczyną wielu zmartwień różnych społeczeństw i przedmiotem coraz bardziej intensywnych działań zmierzających do ich łagodzenia. Działania te są zwykle bardzo kosztowne i nie zawsze powszechnie akceptowane. Niosą one także niemal zawsze skutki, których charakter dobrze oddaje tytuł rozdziału. By jednemu dać, zwykle innemu trzeba odebrać. Rywalizacja o wodę oraz o kontrolę nad żywiołem wodnym i obiektami wodnymi stała się już dawno faktem. Łacińskie słowo *rivalis* oznaczające osobę, która korzysta z tego samego strumienia co my (mieszka po jego drugiej stronie), nabiera dziś szczególnego znaczenia.

„Rzeka – naturalny ciek powstały z połączenia potoków (strumieni, strug) lub wypływający z czoła lodowca, jeziora, źródła (wywierzyska), rzadziej z obszaru zabagnionego, zasilany powierzchniowo i podziemnie wodą z opadów spadłych w jego dorzeczu, mający ukształtowane koryto i płynący pod działaniem siły grawitacyjnej w łożysku i dolinie, wyżłobionych w wyniku działania jego siły erozyjnej” (*Wielka encyklopedia...*, 2004). Trochę to skomplikowane, niejasne, a na pewno za długie. Może więc inaczej: „Rzeka – masa wody płynąca w korycie naturalnym pod wpływem siły ciężkości.” (Klimaszewski, 1978), albo anegdotycznie i w duchu Bellony: „Rzeka – przeszkoda wodna o wilgotności 100%” lub parafrazując „klasyka”: „Jaka rzeka jest – każdy widzi”. Cytując

tych kilka poważnych i mniej poważnych definicji jednego z ciekawszych obiektów przyrodniczych związanych z żywiołem wodnym, pragniemy zwrócić uwagę czytelnika, iż rzeki są tyleż skomplikowanymi, co prostymi składnikami środowiska geograficznego i to jak są postrzegane i rozumiane zależy w dużym stopniu od obserwatora, sposobu poznawania rzeczywistości oraz od celów, jakim ma służyć sam proces poznawania.

Rzeki i systemy rzeczne są układami rejestrującymi oddziaływanie wielu naraz czynników geograficznych. Forma jaką przybierają oraz ilość i jakość wody jaką niosą są zawsze odbiciem warunków środowiska geograficznego, które je otacza i które je ukształtowało. Rzeki w swoisty sposób zapisują też różnego rodzaju zdarzenia i procesy zachodzące w środowisku, np. zmiany klimatyczne, katastrofy geologiczne czy ewolucję biologiczną. Od pewnego czasu rejestrują również szeroko pojmowaną działalność człowieka. Są także tyleż trwałym, co zmiennym elementem tego środowiska. Ich trwałość zawiera w sobie przeważnie element przyjazny, gdyż rzeki postrzegamy nie tylko jako źródło niezbędnej nam wody, energii i pożywienia, ale również jako dogodne szlaki transportowe, miejsca wypoczynku i składniki krajobrazu. Równocześnie jednak, ich zmienność i dynamika kojarzy się nam zwykle z potęgą, zagrożeniem i bezradnością wobec żywiołu. Wyschnięta rzeka staje się wówczas synonimem głodu i pragnienia, a jej wezbrane wody uzmysławiają nam naszą słabość wobec sił przyrody. W tym kontekście rzeka jest swoistym symbolem żywiołu wodnego, który może dawać, ale może również zabierać.

„O rzece myślimy albo praktycznie, czym jest dla naszych korzyści i wygod, lub co w niej jest wrogiego i groźnego, bądź też teoretycznie, jakie jest jej znaczenie dla formowania się powierzchni ziemi i krajobrazu” (Vincenz, 1980). Istnienie i rozwój większości współczesnych społeczeństw trudno sobie wyobrazić bez systematycznego, ale jednocześnie twórczego wykorzystywania rzek i korzyści, które w sobie niosą. Przepisy prawne w zakresie gospodarowania wodami rzecznyymi były i są ważnym instrumentem nie tylko w zakresie wewnętrznej czy międzynarodowej polityki danego państwa, ale także w sferze działań różnych organizacji krajowych i międzynarodowych, poczynając od stowarzyszeń lokalnych, np. Spółek Wodnych czy Związków Wałowych, przez różnego rodzaju zarządy gospodarki wodnej i międzynarodowe organizacje regionalne, np. Regionalne Zarządy Gospodarki Wodnej, czy Komisje ds. Renu, Dunaju lub innych rzek, a kończąc na WMO, WHO i UNESCO. Niemal wszystkie kraje na świecie mają lepiej lub gorzej sformułowane *Prawo wodne* (Polska – Ustawa *Prawo wodne* z 2001 roku – z późniejszymi zmianami), rozumiane jako zbiór praw, powinności i ustaleń dotyczących konsumpcji i użytkowania wody. Reguluje ono sprawy własności wód, ich ochrony i korzystania oraz określa kompetencje organów administracji wodnej, samorządowej i państwowej, w odniesieniu do wszelkich zagadnień związanych z gospodarowaniem ich zasobami. W jego obrębie podstawową rolę pełnią uregulowania dotyczące rzek, zasobów wód rzecznych oraz ochrony przeciwpowodziowej i przeciwdziałania suszy.

W ciągu ostatniego półwiecza podpisano na świecie ponad 200 różnych umów międzynarodowych, w których przedmiotem sporu lub konfliktu była woda lub obiekty wodne. Jednocześnie, ponad 300 tego typu konfliktów do dziś jeszcze nie zażegnano. Wydaje się również, że spory o wodę, a zwłaszcza o wodę pitną oraz konflikty związane z nowo powstającymi obiektami hydrotechnicznymi będą rodzić się nadal, a ich waga i intensywność będą rosły. Woda słodka nie jest bowiem dobrem powszechnie dostępnym, a 60% jej światowych zasobów jest kontrolowane tylko przez dziewięć państw (Kanadę, Rosję, Chiny, Indie, Brazylię, Indonezję, Kongo, Kolumbię, USA). Wybitny pisarz, dziennikarz i podróżnik Ryszard Kapuściński uważał nawet, że wiek XXI będzie stuleciem wojen i konfliktów o wodę.

We współczesnym świecie coraz większej wagi nabierają też działania, które nazywamy „gospodarką wodną”. Jeśli odniesiemy ją do jakiegoś obszaru (kraju, zlewni, regionu) otrzymamy wówczas pewien zamknięty układ systemowy, w którym po jednej stronie istnieją określone zasoby wodne, a po drugiej – potrzeby wodne wymagające zaspokojenia. Układ ten jest jednak zamknięty tylko pozornie, bowiem granice administracyjne, np. międzynarodowe, jedynie wyjątkowo mają charakter hydrograficzny. W XVIII wieku, a więc po dwustu latach wojen o ustanowienie podziału terytorialnego Europy, pojawił się, pomysł ówczesnych europolityków, by demarkację oprzeć na granicach hydrograficznych (działy wodne). Na szczęście dla autorów nie został on zrealizowany, bo ich przodkowie mieliby niemały problem. Musieliby zdecydować, czy być mieszkańcami „państwa wiślańskiego”, czy może „odrzańskiego”.

Jeśli spojrzymy dziś na mapę świata, od razu zauważymy, jak ogromne zmiany zaszły w ostatnim stuleciu w lądowej tkance wodnej naszej planety. „Sztuczne rzeki” (kanały, rurociągi, akwedukty) są powszechnym elementem sieci hydrograficznej, trwale wpisanym w krajobraz i gospodarkę większości regionów świata, a masa wód rzecznych przetrzucanych na duże odległości przekroczyła już 600 km³ rocznie i stanowi prawie 1,5% całkowitego odpływu rzeczno-ego. Niektóre systemy obwałowań, zapory i zbiorniki wodne na dużych rzekach oraz wiele innych elementów infrastruktury przeciwpowodziowej, z uwagi na swoje rozmiary, są już dziś obiektami widocznymi z kosmosu, a zjawisko powodzi czy suszy stało się problemem nie tylko lokalnym czy regionalnym, ale także globalnym. W czasie gdy autorzy pisali tę książkę, ceny wielu podzespołów komputerowych w Europie bardzo wzrosły. Jedną z przyczyn tego faktu była, trwająca od września 2011 roku, ogromna powódź w Tajlandii, która spowodowała zniszczenie wielu zakładów produkujących m.in. twarde dyski oraz bardzo utrudniła miejscowy transport przemysłowy oraz eksport i import wytworzonych w tym kraju produktów.

Ryzyko powodziowe jest kombinacją prawdopodobieństwa wystąpienia zjawiska powodzi oraz potencjalnych negatywnych jej skutków dla zdrowia ludzi, środowiska geograficznego, dziedzictwa kultury i gospodarki człowieka. Obok

umiejętności racjonalnego gospodarowania zasobami wodnymi musimy się szybko nauczyć gospodarowania ryzykiem powodziowym, gdyż zjawisko to będzie nam towarzyszyło nadal, mimo ogromnych kosztów ponoszonych na rzecz ochrony przeciwpowodziowej. Z większości aktów normatywnych, jakie uchwalono w celu kodyfikacji zagadnień ochrony przeciwpowodziowej, wynika, że ochrona i przeciwdziałanie temu kataklizmowi należą do zadań administracji rządowej i samorządowej (np. art. 81 Ustawy *Prawo Wodne*), gdyż podobnie jak pozyskiwanie i dostarczanie wody, tak i ochrona ludzi i ich dobytku leży w interesie ogółu. Jednocześnie wszelkie decyzje dotyczące wody i ochrony przed suszą i żywiołem wodnym powinny być podejmowane na jak najniższym szczeblu i możliwie najbliżej miejsca, którego dotyczą (Ramowa Dyrektywa Wodna UE). Przy ich podejmowaniu warto też sobie uświadomić, że „wszyscy żyjemy w dole rzeki” (Kundzewicz, 2000) i musimy pobierać wodę zużytą przez innych i odprowadzać ścieki, które z kolei będzie musiał użytkować nasz sąsiad. Także budowa wału przeciwpowodziowego, który będzie chronił naszą miejscowość przed powodzią, niemal na pewno spowoduje podwyższenie ryzyka powodziowego na terenach położonych niżej, a awaria zapory wodnej z elektrownią zbudowaną na potrzeby sąsiedniego województwa może się dla nas skończyć dramatyczną powodzią błyskawiczną. Korzystając z wody rzecznej, musimy też wiedzieć, że zaciągamy w środowisku, a często i u naszych sąsiadów, swoistą pożyczkę, którą należy spłacić w stosownej formie, czasie i miejscu.

Identyfikacja i ocena zagrożenia powodziowego występującego na danym obszarze są już dziś przeważnie możliwe, nierzadko również w ujęciu ilościowym. Więcej problemów przysparza natomiast określenie stopnia wrażliwości terenu oraz obliczenie poziomu ryzyka, które zależy przecież zarówno od skali „ekspozycji” na powódź, jak i od „wytrzymałości” obszaru na swoje obciążenie tego rodzaju katastrofą, jakie generuje samo istnienie rzeki. Abstrahując nawet od tego, że ocenę ryzyka prowadzimy przeważnie w oparciu o dane i informacje poufne, objęte często różnego rodzaju tajemnicami, np. handlową, gospodarczą, czy wreszcie ochroną dóbr osobistych, to przecież potencjalne straty powodziowe nie dotyczą wyłącznie dóbr materialnych. Pozostaje przecież jeszcze życie, zdrowie i komfort psychiczny człowieka oraz, nie zawsze dające się policzyć, straty w dobrach kultury i cywilizacji. Jako przykład wyjątkowego cynizmu w tym względzie może służyć, historyczna już dziś propozycja, która padła w 1995 roku na Konwencji Klimatycznej w Berlinie, aby wycena skutków ekonomicznych związanych z utratą życia w czasie katastrof naturalnych była w krajach rozwiniętych 15 razy wyższa niż w regionach rozwijających się (Burroughs, 1997).

Kiedy w 2004 roku przystępowaliśmy do pracy przy projekcie zamówionym przez Rząd RP, a koordynowanym przez Uniwersytet Śląski, pt. *Ekstremalne zdarzenia meteorologiczne i hydrologiczne w Polsce* uważaliśmy, że po doświadczeniach z „dekady żywiołów”, a tak przecież obrazowo nazywano ostatnie dziesięciolecie XX wieku, niezbędne są tego rodzaju skoordynowane prace badawcze

i działania na rzecz lepszego poznania i przeciwdziałania różnym zjawiskom ekstremalnym, które pojawiają się zapewne w przyszłości. Zakres wniosków i liczba publikacji naukowych powstałych w wyniku sygnowanych tym projektem prac badawczych i wdrożeniowych są ogromne i wypada nam tylko skierować Czytelnika do jego obszernej bibliografii.

Doświadczenie zdobyte w toku przeprowadzonych wówczas badań i syntez było tak duże i wielokierunkowe, iż niemal automatycznie zmuszało do wielu refleksji i przemyśleń. Ich wynikiem jest właśnie, oddawana do rąk Czytelnika, monografia. Prezentuje ona, w możliwie przystępnej formie, bardzo szeroki zakres zagadnień związanych z występowaniem, zróżnicowaniem i skutkami wezbrań i powodzi rzecznych na świecie. Przedstawione w niej zagadnienia opracowaliśmy, korzystając z badań i wniosków wyprowadzonych na gruncie różnych dyscyplin naukowych (np. hydrologii, hydrotechniki, meteorologii, gospodarki wodnej). Łączy je natomiast zawsze aspekt geograficzny (przestrzenny) oraz chęć pokazania ogromnej różnorodności zjawisk, problemów i obiektów, z jakimi muszą się zetknąć hydrolodzy, prognozując i badając wezbranie rzeki. Autorzy uważają przy tym, że mimo całego wachlarza działań, metod i rozwiązań stosowanych w hydrologii, wezbrania i powodzie rzeczne są jednym z największych globalnych problemów, z jakimi człowiek musiał, musi i będzie musiał się mierzyć w przyszłości. Aleksander Krawczuk powiedział kiedyś: „Bogów rzek podobno już nie ma, ale sny o rzekach pozostały”. Możemy mieć tylko nadzieję, że nie będą to „nocne koszmary”.

Nie wszystko płynie

Hydrosferę można badać i analizować w różnych aspektach, np. w związku z pochodzeniem Ziemi i jej skorupy, jako składnik ziemskich procesów geochemicznych czy też środowisko powstawania życia na naszej planecie. Jednak hydrologię interesuje ona przede wszystkim jako miejsce powstawania zasobów wodnych. Powszechnie przyjętą definicją pojęcia „hydrosfera” jest określenie jej jako ciągłej powłoki wodnej naszego globu, wyróżniającej się swoistą dynamiką polegającą na ciągłym krążeniu w niej wody. Hydrosferę można również zdefiniować jako przestrzeń, w której występują i krążą wody wolne Ziemi. W takim ujęciu hydrosfera „przenika” zarówno do atmosfery, jak i do litosfery, a równocześnie podkreślona zostaje jej dynamika.

Poglądy na ten temat ilościowej charakterystyki hydrosfery mają już dziś swoją historię. Szacunki objętości poszczególnych jej elementów, jak też oceny wydajności działających w niej procesów zmieniały się dawniej i zmieniają się dziś i to nie tylko wskutek przyrastania liczby oraz dokładności uwzględnianych materiałów badawczych, ale również w wyniku antropogenicznych i naturalnych przeobrażeń jej struktury – zatrzymywania wody w zbiornikach, eksploatacji zasobów statycznych wód podziemnych, zmiany linii brzegowej mórz, wzrostu ewapotranspiracji, topnienia lodów itp.

Całkowita powierzchnia Ziemi wynosi 510 mln km². Około 71% tej powierzchni zajmują oceany i morza, reszta – 29% to obszary lądowe. Całkowita masa mórz i oceanów jest ponad cztery razy większa niż łączna masa wszystkich lądów, które „wystają” ponad powierzchnię Wszechoceanu, oraz 266 razy większa od masy atmosfery znajdującej się powyżej.

Analizując rozmieszczenie mórz i oceanów na naszej planecie, łatwo zauważymy, że większość kontynentów znajduje się na Półkuli Północnej. Fakt ten, jak i istotne różnice w rozmieszczeniu oceanów i lądów na poszczególnych szerokościach geograficznych oraz nierównomierne rozmieszczenie pasm górskich wywołują dość wyraźnie zaznaczające się w skali globalnej różnice klimatyczne między obiema półkulami. Ich skutkiem jest m.in. to, że Półkula Północna jest wilgotniejsza niż Południowa, zaś ta ostatnia charakteryzuje się intensywniejszym parowaniem w strefie równikowej i ogromnym nagromadzeniem lodu w strefie polarnej.

Biorąc pod uwagę skalę globalną, łatwo można dowiedzieć, że wybrzeża oceanów otrzymują zwykle więcej opadów niż interior kontynentów. To zaś prowadzi wprost do wniosku, że wilgotność kontynentu jest tym większa, im mniejsza jest

jego powierzchnia, a jednocześnie – dłuższa jego linia brzegowa. Jeśli dla każdego kontynentu obliczymy wskaźnik zwartości, czyli stosunek obwodu koła o powierzchni równej obszarowi kontynentu do długości jego wybrzeża, to otrzymane liczby będą się bardzo różniły. Średnia dla wszystkich kontynentów będzie bliska 0,5, ale największą zwartością będą się charakteryzować Afryka (0,64) i Ameryka Południowa (0,52), zaś najmniej zwarte będą Azja (0,33) i Ameryka Północna (0,23). Zatem to właśnie te dwa kontynenty powinny charakteryzować się największym uwilgotnieniem.

Panuje powszechne przekonanie, że hydrosfera zawiera ogromne ilości wody. Jej całkowita objętość wynosi bowiem ok. 1,386 mln km³. Zauważmy wszakże, że w 97,5% jest to woda słona, a jedynie 2,5% stanowi woda słodka (35 mln km³). Również z tej, wydawałoby się dużej, objętości wody słodkiej, tylko 4,2 mln km³ są dziś dostępne człowiekowi. Zauważmy bowiem, że procentowo największa ilość wody słodkiej uwięziona jest w lodzie, wieloletniej zmarzlinie i pokrywie śnieżnej Antarktydy, Arktyki oraz obszarów polarnych i gór (68,7%). Kolejne 29,9% zasobów wód słodkich jest także trudno dostępne, gdyż znajduje się w litosferze (wody podziemne). Jedynie 0,26%, całkowitej objętości wody słodkiej na Ziemi jest zmagazynowana w jeziorach, zbiornikach wodnych i w systemach rzecznych. Właśnie do tych zasobów mamy najłatwiejszy dostęp, gdy chodzi o realizację potrzeb ekonomicznych. Spełniają one również podstawową rolę w kształtowaniu lądowych ekosystemów wodnych.

Masy wodne Ziemi znajdują się w ciągłym ruchu. Wywołują go procesy stymulowane głównie przez radiację słoneczną, grawitację oraz zmiany ciśnienia atmosferycznego, a w mniejszym stopniu także przez ciepło uwalniane z wnętrza Ziemi. Wśród procesów wywołujących ten ruch najważniejszą rolę pełnią: cyrkulacja atmosferyczna i oceaniczna, parowanie i transpiracja, opad atmosferyczny oraz odpływ powierzchniowy i podziemny. Współcześnie coraz większego znaczenia nabierają również procesy wywoływane i stymulowane przez człowieka.

Każdego roku z powierzchni Ziemi paruje ok. 577 tys. km³ wody, przy czym oceany dostarczają do atmosfery 502 800 km³ wody, a lądy – 74 200 km³. Warto podkreślić, że na wyparowanie tak dużej ilości wody zużywane jest ok. 20% energii słonecznej docierającej do Ziemi. Przechodzeniu wody z fazy ciekłej w gazową i odwrotnie towarzyszy pobór lub oddawanie ogromnych ilości energii w postaci ciepła. Zatem obieg wody w atmosferze wiąże się z pobieraniem, transportem i oddawaniem energii cieplnej. Taka sama ilość wody spada w ciągu roku na naszą planetę w postaci różnych form opadu atmosferycznego: na oceany – 458 tys. km³ wody, na lądy – 119 tys. km³. Nadwyżka opadu, jaka powstaje na lądach – ok. 44 800 km³ formuje całkowity odpływ rzeczny (ok. 42 750 km³ na rok) oraz bezpośredni odpływ wód podziemnych do oceanu (2150 km³ rocznie). Woda ta nie tylko wyrównuje bilans wodny zbiorników oceanicznych, ale tworzy też podstawowe zasoby służące zaspokojeniu potrzeb życiowych i działalności ekonomicznej współczesnego człowieka.

Woda w globalnym procesie krążenia znajduje się w ciągłym ruchu, przemieszczając się z jednego ogniwa krążenia do drugiego oraz z jednego obszaru na inny, niejako przy okazji zmieniając również swój stan skupienia i właściwości fizyczne i chemiczne. Są jednak ogniwa tego obiegu, w których jest ona zatrzymywana na stosunkowo długi czas – tempo odnawiania zasobów jest tam bardzo wolne (kilka tysięcy lat). Należy tu wymienić przede wszystkim zbiorniki wód podziemnych oraz baseny oceaniczne. W odniesieniu do wód powierzchniowych występujących na lądzie, stosunkowo długim czasem odnawiania charakteryzują się wody retencjonowane w lądolodach i lodowcach, wieloletniej zmarzlinie, misach jeziornych, podmokłościach i bagnach strefy tropikalnej oraz w torfowiskach strefy umiarkowanej. Wymiana wody w tych ogniwach krążenia trwa stosunkowo długo (od kilku do kilkuset lat), a zaburzenie jej tempa powoduje różnorodne skutki w odniesieniu do klimatu i obiegu wody na Ziemi. Jednocześnie tempo wymiany wód w ogniwach: atmosferycznym, glebowym i rzeczonym jest bardzo szybkie i mierzy się je w miesiącach, dniach, a w przypadku organizmów żywych nawet w godzinach. Dynamika procesów atmosferycznych, i to zarówno w aspekcie czasowym, jak i przestrzennym, jest ogromna. Łatwo obliczyć, że cząsteczka wody niesiona wiatrem o prędkości $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, może w ciągu 10 dni potrzebnych średnio na odnowienie całych zasobów wodnych atmosfery pokonać odległość bliską połowie równikowego obwodu Ziemi, a więc przenieść się z Atlantyku np. do Australii. Wystarczy też kilkanaście dni, by kropelki wody znajdujące się we wszystkich rzekach świata wymienić na „nowe”. Odpływ rzeczny należy zatem do najbardziej dynamicznych procesów zachodzących w hydrosferze. Jest on również, obok parowania i opadu, najważniejszym na Ziemi regulatorem jej budżetu masy i energii.

Systemy rzeczne, jakie zostały ukształtowane w wyniku procesu odpływu, są niezwykle złożonymi układami, rejestrującymi oddziaływanie wielu czynników równocześnie. Forma, jaką przybierają rzeki i ich doliny, ilość wody jaką niosą oraz jej dynamika, a także charakter całych systemów rzecznych są zawsze odbiciem warunków środowiska geograficznego, w którym funkcjonują. Rzeki w swoisty sposób zapisują różnego rodzaju zdarzenia i procesy klimatyczne, geologiczne, biologiczne. Od pewnego czasu rejestrują one również, i to bardzo wyraźnie, szeroko pojmowaną działalność człowieka. Choć masa wody, jaką niosą w danej chwili wszystkie rzeki świata, jest tylko dwukrotnie większa od objętości wody, jaką zawierają w sobie organizmy żywe Ziemi, to znaczenie wód rzecznych w historii naszej planety było i jest ogromne. Obok wody, rzeki koncentrują bowiem ogromną ilość energii nagromadzonej na kontynentach, a także są nośnikiem i przekaźnikiem wielu substancji oraz informacji genetycznej.

Formy, jakie powstają w wyniku odpływu rzecznych, są jednym z najtrwałszych elementów rzeźby i krajobrazu. Z tego powodu kształt dolin, ich gęstość i wielkość oraz rodzaj gromadzonych w nich osadów i sposób ich depozycji uznawane są powszechnie za jedną z doskonałych wskazówek zmian zachodzących

w środowisku, w tym zmian klimatycznych, oraz przemian sposobu i tempa obiegu wody. Zmiany i fluktuacje klimatu były, i są nadal, decydującym wydarzeniem w historii rzek i stymulatorem zmian ich reżimu odpływu. Można nawet powiedzieć, że historia rzek jest zsynchronizowana z historią zmian klimatu na Ziemi.

W przeszłości stwierdzono wiele gwałtownych zmian klimatu, i to zmian, które nastąpiły w ciągu kilkudziesięciu lat. Współcześnie obieg wody na kontynentach zbliża się do swoistego progu, którego przekroczenie może doprowadzić do takiego właśnie łańcucha wydarzeń. Prawdopodobieństwo takiej niekorzystnej sekwencji zdarzeń jest dzisiaj nawet większe niż dawniej. Istniejące bowiem na Ziemi ekosystemy, wskutek działalności człowieka, są coraz bardziej niestabilne; na przykład globalnemu wzrostowi odpływu na wielu obszarach towarzyszy jednocześnie stały deficyt wody na innych terenach.

Tabela 1. Dopływ wód rzecznych do Wszechoceanu

Szerokość geograficzna	Dopływ wód rzecznych [$\text{km}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$]				
	M. Arktyczne	O. Atlantycki	O. Indyjski	O. Spokojny	Wszechocean
90° – 80° N	50	0	0	0	50
80° – 70°	2 126	0	0	0	2 126
70° – 60°	2 105	560	0	926	3 621
60° – 50°	0	1 903	0	1 711	3 614
50° – 40°	0	1 975	0	728	2 703
40° – 30°	0	377	0	1 771	2 148
30° – 20°	0	931	1 574	814	3 319
20° – 10°	0	851	1 170	636	2 657
10° – 00°	0	2 519	444	1 840	4 803
00° – 10°	0	9 040	909	2 043	11 992
10° – 20°	0	229	514	195	938
20° – 30°	0	148	160	70	378
30° – 40°	0	779	49	326	1 154
40° – 50°	0	444	38	689	1 171
50° – 60°	0	43	0	432	475
60° – 70°	0	0	0	0	0
70 – 80°	0	0	0	0	0
80 – 90° S	0	0	0	0	0
Razem	4 280	19 800	4 860	12 210	41 150

Ź r ó d ł o: A.H. Doganovski, W.N. Malinin, 2004.

Średnie roczne natężenie przepływu wszystkich rzek świata wynosi ok. $100 \text{ km}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. W skali rocznej, ok. 42% odpływu rzecznoego dociera do Wszechocanu z obszarów położonych pomiędzy 10°N i 10°S (tab. 1). Największa rzeka na Ziemi – Amazonka – oddaje do Wszechocanu ok. 16% rocznego globalnego odpływu całkowitego. Około 27% światowych zasobów wód słodkich formuje się na terytorium pięciu największych dorzeczy: Amazonki, Gangesu i Brahmaputry, Kongo, Jangcy oraz Orinoko. Prawie połowę światowego odpływu rzecznoego odbiera Ocean Atlantycki; wpadają do niego cztery z sześciu najważniejszych rzek świata (Amazonka, Kongo, Orinoko, Parana). Jednocześnie tylko 2,3% (ok. $1000 \text{ km}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$) globalnego, rocznego odpływu rzecznoego powstaje na obszarach endoreicznych, które zajmują aż 20% powierzchni lądowych Ziemi (w Australii – 40%). Ale i na obszarach egzoreicznych straty na parowanie z sieci rzecznoej są ogromne. Oszacowano, że rocznie ok. 1100 km^3 wody formującej odpływ rzecznoej wyparowuje z rzek, zanim dotrze do Wszechocanu. W ramach tej objętości 380 km^3 przypada na Azję, 300 km^3 na Afrykę, a 340 km^3 na Amerykę Północną (Shiklomanov, Rodda, 2004).

Tabela 2. Sezonowa struktura odpływu rzecznoego

Część świata	Średni roczny odpływ rzecznoej V [km^3]	Udział poszczególnych miesięcy w rocznej sumie odpływu [%]											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Europa	2 900	6,2	6,6	6,9	8,9	14,3	13,3	9,2	7,6	7,3	6,9	6,6	6,2
Ameryka Północna	7 870	4,7	4,9	5,0	7,0	11,6	15,2	12,6	9,9	9,6	8,6	5,9	5,0
Afryka	4 047	8,4	7,5	7,0	7,1	7,5	6,6	6,1	6,1	8,0	10,6	12,7	12,4
Azja	13 510	5,1	4,1	4,7	5,1	8,8	13,7	14,9	13,8	11,2	7,2	6,8	4,6
Ameryka Południowa	12 030	5,9	7,0	8,1	10,0	11,4	12,1	11,1	9,7	7,6	6,0	5,5	5,6
Australia i Oceania	2 400	10,3	13,2	12,4	10,1	7,4	7,1	6,2	6,9	5,4	6,6	7,2	7,2
Świat	42 757	5,9	5,6	6,8	7,3	10,3	12,4	12,1	11,4	9,5	7,5	5,7	5,5

Źródło: J.A. Shiklomanov, J.C. Rodda, 2004.

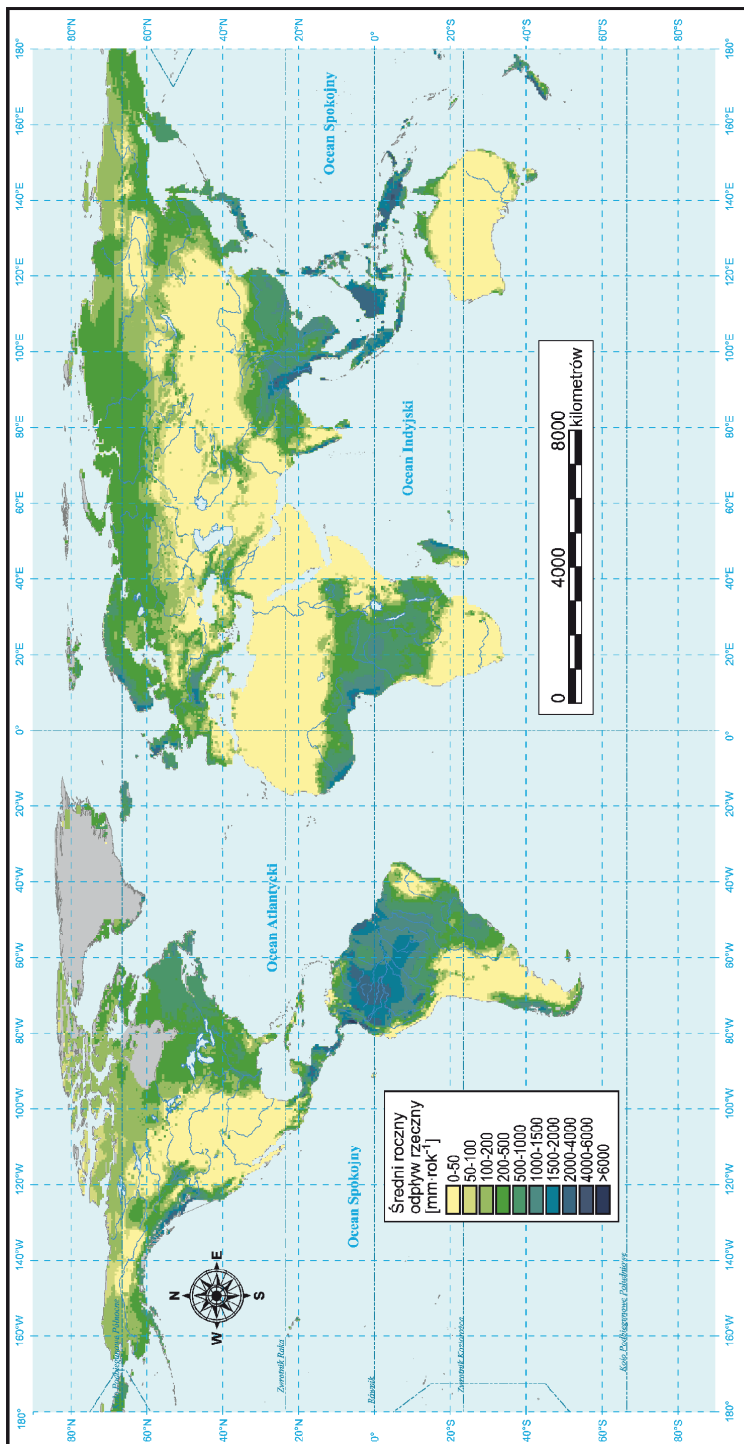
Odpływ rzecznoej jest bardzo nierównomiernie rozmieszczony w różnych częściach świata i niemal równie zmienny sezonowo (tab. 2). Najwyższe wartości

odpływów rzecznych w Europie występują między kwietniem i lipcem (46% sumy rocznej), w Azji między czerwcem a wrześniem (54%). W Afryce najzwyklejsze w wodę są miesiące od października do grudnia (35,7%), w Ameryce Południowej od kwietnia do lipca (44,6%), a w Australii i Oceanii od stycznia do kwietnia (46%). Można przyjąć, że średnio dla całej Ziemi pora największych odpływów rzecznych przypada na czas między majem a październikiem. Odpływ w tym półroczu stanowi przeciętnie 63% odpływu rocznego. Warto też podkreślić, że w okresach wezbraniowych, trwających zwykle ok. 3–4 miesięcy, formuje się od 60 do 80% światowego odpływu rzecznego.

Odpływ rzeczny na świecie jest bardzo zróżnicowany także przestrzennie (rys. 1). Różnice wynikające ze strefowości klimatycznej i uwarunkowań morfologicznych potęgują dodatkowo czynniki związane z globalną cyrkulacją mas powietrza i wód oceanicznych. Nakładają się na to jeszcze czynniki związane z budową geologiczną, pokryciem terenu, a także, z działalnością człowieka. Wszystko to powoduje, że odpływ rzeczny z poszczególnych kontynentów, czy też z obszarów leżących w poszczególnych strefach klimatycznych, jest bardzo zróżnicowany. Warto przy tym podkreślić, że w odniesieniu do wielkości przeciętnych, różnice międzykontynentalne i międzystrefowe są dużo mniejsze niż różnice pojawiające się w obrębie poszczególnych stref czy kontynentów. Przestrzenne rozmieszczenie odpływu na Ziemi ma charakter wybitnie strefowy. Występują trzy wyraźne maksima: w strefie równikowej i w strefach szerokości umiarkowanych oraz cztery lokalne minima: dwa w rejonach zwrotnikowych i podzwrotnikowych oraz dwa w strefach polarnych.

Przeciętnie z lądowych obszarów Ziemi rzeki odprowadzają rocznie 360 mm wody. Najwyższą warstwą odpływu charakteryzuje się terytorium Ameryki Południowej. Przy średnim opadzie równym ok. 1600 mm łączny odpływ z tego obszaru sięga 600 mm. Zatem średni współczynnik odpływu dochodzi tutaj do 35%. Najmniejsze zasoby wód rzecznych występują zaś w Afryce. Rzeki tego kontynentu dostarczają do oceanu światowego jedynie 140 mm wody, przy średnim opadzie równym ok. 680 mm. Współczynnik odpływu wynosi więc zaledwie 23%. Stosunkowo dużo wody niosą natomiast rzeki europejskie. Wskaźnik odpływu sięga tu 320 mm, co przy uwzględnieniu opadów na poziomie 730 mm, daje współczynnik odpływu równy 43%. Warto dodać, iż współczynnik ten jest najwyższy wśród obliczonych dla wszystkich kontynentów. Europę należy więc uznać za najlepiej odwadnianą część świata.

Jeszcze bardziej zróżnicowane są średnie odpływy z poszczególnych stref klimatycznych. W klimatach równikowych przeciętny odpływ rzeczny wynosi 1200 mm, by w strefie zwrotnikowej obniżyć się do 50 mm i mniej. Również współczynniki odpływu zmieniają się tu w bardzo szerokich granicach: od poniżej 10% w strefie klimatów zwrotnikowych suchych do powyżej 60% na obszarach okołorównikowych.



Rys. 1. Przeciętny odpływ rzeczny na świecie w latach 1950–2000 (Fekete i in., 2002, zmienione)

Zróźnicowanie przestrzenne odpływu na obszarach w poszczególnych strefach klimatycznych jest także duże i stanowi konsekwencję zmian stopnia oceanizmu klimatu oraz czynników lokalnych, w tym orograficznych i geologicznych. W strefie tropikalnej Azji całkowity odpływ rzeczny może być mniejszy niż 300 mm, ale może również przekraczać 1500 mm. Systemy rzeczne odwadniające wyżynę Dekanu w Indiach charakteryzują się warstwą odpływu na poziomie 200–400 mm, przy współczynnikach odpływu nie przekraczających kilku procent. Równocześnie, szereg rzek Półwyspu Indochińskiego odprowadza do oceanów ponad 1500 mm wody, a współczynniki odpływu sięgają tam nawet 40%.

Podobne różnice występują w strefie klimatów umiarkowanych. Bardzo zasobne w wodę są np. rzeki Japonii. Roczna warstwa odpływu jest tam bardzo wysoka i sięga 600–1000 mm, lokalnie przekraczając nawet 1500 mm. Równocześnie, płynące w tej samej strefie klimatycznej rzeki północnych Chin i Mongolii charakteryzują się zwykle wskaźnikami odpływu mniejszymi niż 100 mm, przy współczynnikach odpływu od kilku do kilkunastu procent.

Najwyższy średni odpływ jednostkowy cechuje terytorium Ameryki Południowej. Spoglądając jednak na mapę odpływu rzeczno tego kontynentu, można łatwo zauważyć ogromną zmienność przestrzenną tej składowej bilansu wodnego. W pasie równikowym, gdzie nadwyżka opadów wyprowadzana jest przez największy na świecie system rzeczny Amazonki, warstwa odpływu przekracza 1000 mm, sięgając nawet 1500 mm. Amazonka jest przy tym przykładem dorzecza prezentującego, prawie w czystej formie, cechy równikowego reżimu odpływu. Przepływ rzeki w Obidos (ok. 1100 km od ujścia) wynosi średnio ok. $220\,000\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Daje to roczną warstwę odpływu bliską ok. 1000 mm i współczynnik odpływu ok. 50%. Największą ilość wody rzeka ta prowadzi od kwietnia do lipca, choć różnice między przeciętnymi z poszczególnych miesięcy nie przekraczają zwykle 60%.

W zlewniach systemu Orinoko oraz w dorzeczach kolumbijskiego wybrzeża Ameryki Południowej odpływy roczne sięgają nawet 6000 mm. Podobne ilości wody odprowadzają rzeki Ameryki Środkowej. Przy opadzie w granicach 4000–5000 mm, warstwa odpływu mieści się tam w przedziale od 2 do 3 tys. mm. Rzeki są tu stosunkowo krótkie, ale bardzo trudne do ujarznienia. Jeśli dodamy do tego częste trzęsienia ziemi, liczne cyklony oraz aktywne wulkany, to łatwo można zgodzić się z opinią jednego z tamtejszych XIX-wiecznych dyplomatów, że „Dzięki Bogu mieliśmy tego roku tylko dwie powodzie, dwa trzęsienia ziemi i trzy rewolucje” (Nałkowski, 1894). Również w dorzeczach zachodniego skłonu południowych Andów odpływy są wysokie i przekraczają 2500 mm, a współczynniki odpływu sięgają lokalnie 80–90%, natomiast w równikowych i podrównikowych klimatach wnętrza Ameryki Południowej oraz na wschodnich krańcach tego kontynentu odpływy są dużo niższe. W dorzeczu Sao Francisco, na Wyżynie Brazylijskiej, wskaźniki odpływu kształtują się na poziomie 10–200 mm, obniżając się lokalnie nawet do kilku milimetrów. Niskie odpływy notuje się także w Patagonii i na pustyni

Atacama. Przeciętne współczynniki odpływu wynoszą tam kilkanaście procent, a w niektórych miejscach obniżają się nawet do kilku procent.

Najmniejszy odsetek wody opadowej odprowadzają rzeki afrykańskie i australijskie, choć i na tych kontynentach kontrasty współczynnika odpływu są bardzo duże. W Afryce wyraźnie zaznacza się przy tym strefowość klimatyczna. Największą ilość wody na tym kontynencie wprowadzają do Wszechoceanu rzeki odwadniające zachodnią część Afryki równikowej. Z dorzeczy rzek Konkoure, Buri czy Loba, przy średnich rocznych opadach rzędu 2000–2500 mm, odpływa rocznie ok. 1000–1500 mm wody. Tej wysokości odpływy spotykamy również w dorzeczach niektórych rzek Madagaskaru oraz w zlewniach rzek odwadniających liczne pasma górskie wnętrza kontynentu afrykańskiego.

Na obszarach tropikalnych i subtropikalnych Czarnego Łądu odpływ jest zwykle niższy niż 200 mm, a jedynie w systemie Kongo wzrasta do ponad 400 mm. Na terytoriach sawann i pustyń afrykańskich odpływy są prawie zerowe. Typowym zjawiskiem są tu rozległe niecki bezodpływowe. To właśnie w nich gubią wodę epizodyczne, a tylko czasem okresowe, strumienie zwane *ouedi* (*wadi*). Typowym przykładem jest cały system ouedów odprowadzających w kierunku Sahary wody pochodzące z opadów w górach Atlas.

Jedną z tych rzek, oued Saoura, nazywana też „małym Nilem”, ma powierzchnię zlewni zbliżoną do 100 tys. km², z której jedynie 40% można uznać za właściwy obszar alimentacyjny. Obejmuje on niewielkie fragmenty Atlasu Zachodniego i Atlasu Saharyjskiego. Na pozostałą część dorzecza składają się rozległe i areiczne obszary pustynne Wielkiego Ergu o opadach bliskich zeru. Przepływy wywołane opadami w górach Atlas mogą pojawić się w korycie tego saharijskiego ouedu właściwie w każdej porze roku. Najczęściej jednak występują latem. Od natężenia i ilości opadu w górach zależy przy tym „południowy” zasięg fali wezbraniowej płynącej jego korytem.

W okresie 70 lat obserwacji woda w korycie ouedu Saoura pojawiła się tylko 135 razy, przy czym dwa razy zaobserwowano ją aż w rejonie Reggane. Czas trwania przepływu w korycie jest zróżnicowany. W czasie okresu obserwacji najtrwalszy przepływ zanotowano w 1967 roku. W rejonie Beni Abbes koryto ouedu prowadziło wówczas wodę przez pięć kolejnych miesięcy. Przepływy w tej rzece mogą być bardzo duże. W 1959 roku, u wylotu ouedu z gór Atlas, zanotowano natężenie przepływu przekraczające 2500 m³ · s⁻¹. Na pograniczu Maroka przepływ sięgał nawet 5500 m³ · s⁻¹, a więc był bliski wartości zanotowanej w Warszawie w czasie kulminacji fali wezbraniowej w 1997 roku (5200 m³ · s⁻¹).

Niezwykle zasobne w wodę są rzeki odwadniające wyspy Pacyfiku, a w szczególności Indonezję, Filipiny oraz Nową Zelandię (tab. 3). Opady na dowietrznych stokach Jawy, Borneo i Celebesu przekraczają zwykle 4000 mm, sięgając nawet 5000 mm. Duże uwilgotnienie powietrza wysoce ogranicza parowanie i powoduje, że współczynniki odpływu tych rzek są najczęściej wyższe niż 60%, a warstwa odpływu przekracza 1000 mm, dochodząc nawet do 3000 mm. Swoistym

ewenementem jest rzeka Cagayan (wyspa Luzon). Powierzchnia jej dorzecza przekracza nieco 4200 km², a odpływ, przy opadach bliskich 2100 mm, wynosi średnio 1950 mm. Daje to najwyższy na świecie współczynnik odpływu, bliski 93%.

Tabela 3. Najwyższe roczne odpływy rzeczne na świecie

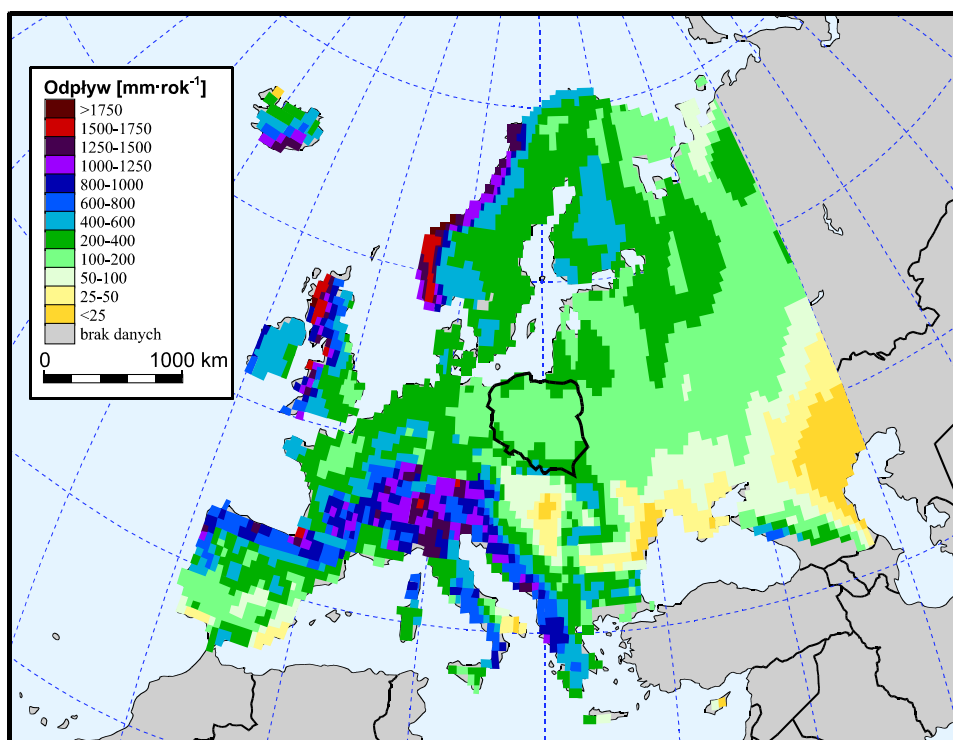
Rzeka	Kraj (kontynent)	Powierzchnia zlewni [km ²]	Odpływ roczny	
			[km ³]	[mm]
Hokitika	Nowa Zelandia (A&O)	350	3,1	8 900
Esk	Nowa Zelandia (A&O)	250	1,7	6 800
Naya	Kolumbia (S A)	2 000	13,0	6 500
Haast	Nowa Zelandia (A&O)	930	6,0	6 450
Speel	Alaska – USA (N A)	580	3,1	5 300
San Juan	Kolumbia (S A)	16 000	82,0	5 100
Taramakau	Nowa Zelandia (A&O)	1 000	4,8	4 800
Baudo	Kolumbia (S A)	5 400	24,0	4 400
Micay	Kolumbia (S A)	4 400	19,0	4 300

Źródło: J.D. Milliman, K.L. Farnsworth, 2011.

Położona w zupełnie innej strefie klimatycznej Nowa Zelandia charakteryzuje się również bardzo wysokim odpływem. Sprzyja temu oczywiście stała dostawa z zachodu wilgotnych mas powietrza oceanicznego – dryf wiatrów zachodnich oraz górzysty krajobraz obu wysp. W zachodniej części Wyspy Południowej warstwa odpływu w zlewniach rzek o powierzchni 500–1000 km² sięga lokalnie 9000 mm. Daje to średnie odpływy jednostkowe dochodzące do 300 dm³ · s⁻¹ · km⁻², a więc wartości osiągnane w Polsce tylko w trakcie wysokich wezbrań rzek górskich i wyżynnych. Z całego terytorium Nowej Zelandii odpływa średnio w roku ok. 400 km³ wody. Powierzchnia tego kraju wynosi ok. 270 tys. km². Zatem, po uwzględnieniu różnicy powierzchni, odpływ roczny jest tutaj 10 razy większy niż w Polsce.

Odpływy rzek w strefie polarnej i subpolarnej są małe i bardzo często mają charakter okresowy lub nawet epizodyczny. Przyczyną jest wieloletnia zmarzlina oraz wielomiesięczne przemarznięcie małych i średnich rzek do dna. Warto w tym miejscu podkreślić, że zamarzanie to jest skutkiem zimowego przerwania dopływu „ciepłych” wód podziemnych do koryta. Długotrwały brak związku hydraulicznego koryta z wodami podziemnymi skutkuje bardzo niskimi współczynnikami zasilania podziemnego rzek północnej Rosji, Kanady i Alaski, lokalnie mniejszymi niż 5%. W północno-zachodniej części Rosji do dna zamarzają rzeki o powierzchni zlewni do 1000 km², a w Kazachstanie nawet do 5000 km². W Jakucji rzeki o powierzchni zlewni ok. 1000 km² zamarzają przeciętnie na pół roku, a rzeki małe (100 km²) nawet na 240 dni (Doganovskij, Malinin, 2004).

Jeszcze krócej trwa odpływ w rzekach zasilanych z lodowców górskich i lodowców strefy polarnej. Okresowe (często epizodyczne) strumienie tworzą na powierzchni lodu koryta ablacyjne, które funkcjonują tylko w czasie krótkiego lata. Przepływy w tych ciekach, zwykle niewielkie, epizodycznie mogą być jednak bardzo duże. Ablacja zachodzi również wewnątrz i pod lodowcem (lodowce ciepłe), a funkcjonujące tam liczne i rozwinięte w pionie i poziomie systemy studni, kanałów i jaskiń sprawiają, że trudno oprzeć się pokusie, by sposobu odwadniania czaszy czy jezora lodu nie przyrównać do drenażu znanego z obszarów krasowych (kriokras). Zwykle proces odwadniania lodowca odbywa się spokojnie, ale wystarczy dodatkowy impuls, np. wzmożony dopływ ciepła z wnętrza Ziemi, i katastrofa gotowa. Wezbrania typu *jökulhlaup* (np. na Islandii) zdarzają się rzadko, ale są to zjawiska niezwykle niebezpieczne. Łączny dopływ wody pochodzącej z topniejących lodowców i lądolodów do Wszechoceanu Ziemi wynosi rocznie 3450 km³, przy czym lodowce górskie dostarczają tylko 12–13% tej masy. Są jednak rejonry, gdzie wody z ablacji tych lodowców stanowią 6% (rzeka Kubań), a nawet 8% (rzeka Kolumbia) odpływu rocznego (Doganovskij, Malinin, 2004).



Rys. 2. Przeciętny roczny odpływ rzeczny w Europie (Zieliński i in., 1996, za „Europe’s Environment”, 1995)

Terytorium Europy, mimo stosunkowo niewielkiej powierzchni i małego zróżnicowania klimatycznego, charakteryzuje się dość dużą zmiennością przestrzenną odpływu. Zaznacza się tu wyraźnie wpływ oceanizmu i kontynentalizmu klimatu, jak też efekty wywołane orografią i budową geologiczną. Ponadto, duże rozczłonkowanie Europy nie pozwoliło na powstanie tu wielkich systemów rzecznych – przeważają więc dorzecza i rzeki małe. Również działy wodne mają w Europie dość specyficzny przebieg. Biegają bowiem często po obniżeniach i nie nawiązują do głównych pasm górskich (np. działy kontynentalne oddzielające Morze Bałtyckie od Morza Północnego i Morze Czarne od Morza Śródziemnego). Najwięcej wody z Europy trafia do Oceanu Atlantyckiego – 2114 km³ rocznie (312 mm). Do Morza Arktycznego dociera w ciągu roku 735 km³ (480 mm).

Tabela 4. Najwyższe roczne odpływy rzek europejskich (A > 100 km²)

Kraj	Rzeka	Wodowskaz	Powierzchnia zlewni [km ²]	Odpływ roczny	
				[km ³]	[mm]
Niemcy	Mueglitz	Dohna	198	1,94	9802
Islandia	Tungufljot	Faxi	198	1,55	7810
Rosja (Eu)	Terek	Ordzhonikidze	1490	10,86	7286
Norwegia	Kinso	Holen	229	1,45	6339
Bośnia i Herc.	Sava	Stremska Mitrovica	8800	51,12	5809
Francja	Ardeche	Aubenas	470	1,99	4240
Islandia	Bruara	Dynjandi	596	2,05	3447
Norwegia	Etneelv	Stordalsvatn	127	0,39	3056
Szwajcaria	Reuss	Mellingen	3382	10,07	2977
Norwegia	Nausta	Naustundvatn	220	0,61	2754
Islandia	Vatnsdalsa	Bru	102	0,26	2537
Norwegia	Gaular	Viksvatn	505	1,27	2506
Islandia	Fossa	Eyjolfsstadir	113	0,26	2262
Czechy	Cidina	Novy Bydzov	452	1,00	2220
Islandia	Eystri-Ranga	Tungufoss	293	0,65	2208
Islandia	Olfusa	Selfoss	5678	12,21	2151
Norwegia	Loelv	Lovatn	231	0,48	2077
Norwegia	Fusta	Fustvatn	520	1,04	1997
Norwegia	Eidselv	Hornindalsvatn	378	0,69	1837

Źródło: R.W. Herschy, 2003.

W południowej części obszaru europejskiego dominuje śródziemnomorski reżim odpływu, a podwyższone odpływy jednostkowe występują na terenach gór i wyżyn oraz w obrębie dobrze rozwiniętego krasu (rys. 2). W Apeninach, Pirenejach i w górach Półwyspu Bałkańskiego średnie warstwy odpływu przekraczają często 1000 mm, a współczynniki odpływu sięgają nawet 40%. W tej części Europy jedynie rzeki odwadniające Półwysep Iberyjski prowadzą stosunkowo mało wody. Średni odpływ roczny rzadko przekracza tam 200 mm, a lokalnie maleje nawet do 50 mm. W strefie klimatów umiarkowanych zróżnicowanie odpływu jest równie duże. Odpływy roczne mogą tu przekraczać 2000 mm (Alpy, Kaukaz), jak też mogą być niższe niż 50 mm. Współczynniki odpływu zawierają się także w bardzo szerokich granicach: od kilku do ponad 50%.

Duże ilości wody niosą rzeki odwadniające północno-zachodnie skłony Gór Skandynawskich oraz zachodnie i północne obszary Wysp Brytyjskich. Wysokie odpływy notowane są również w Islandii (tab. 4). Roczne sumy odpływu przekraczają, w tych rejonach Europy, 1000–1500 mm, przy opadzie w granicach 2000–3000 mm. W latach intensywnej ablacji lodowcowej, która w półroczu ciepłym dochodzi do 50 mm na dobę (Norwegia, Islandia, Alpy), roczne sumy odpływu mogą być szczególnie wysokie. Równocześnie na terenie Niziny Panońskiej, w Andaluzji oraz na stepach Ukrainy średni odpływ roczny rzadko przekracza 50 mm, a współczynniki odpływu oscylują w granicach kilku procent.

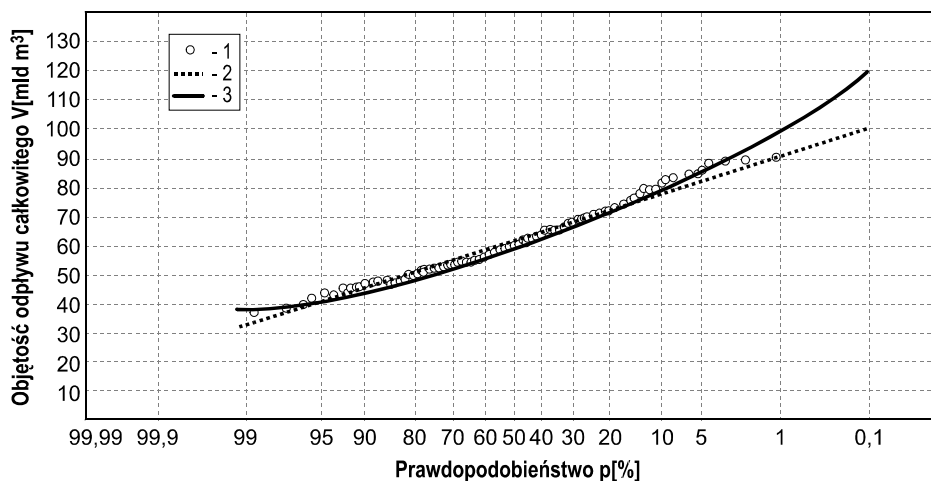
Liczba cieków w Polsce jest bardzo trudna do oszacowania. Według danych IMiGW, wynosi ona dziś 14 044, w tym:

- 1553 cieki o powierzchni zlewni od 50 km² do 500 km²,
- 182 rzeki o powierzchni zlewni od 500 km² do 10 tys. km²,
- osiem rzek o powierzchni zlewni większej od 10 tys. km².

Wszystkie te cieki mają łączną długość ok. 133 tys. km. Nieco ponad 6700 strug ma swoje nazwy (Czarnecka i in., 2010).

Całkowity odpływ rzek Polski formuje się na obszarze większym o 12,3% od powierzchni naszego kraju – 351 028 km². Mimo to granice Polski w dużym stopniu mają charakter hydrograficzny. Nasze zasoby wodne są więc w ogromnym stopniu autochtoniczne i to my odpowiadamy za ich ilość i jakość. Z ogólnej masy wód odpływających rzekami, na dorzecze Odry przypada ok. 27,5%, na dorzecze Wisły ok. 54,8%, a na dorzecza pozostałych rzek uchodzących do Bałtyku i Zalewu Wiślanego odpowiednio 9,5 i 5,9%. Z tych czterech głównych obszarów hydrograficznych odpływa łącznie ok. 97,7% całkowitej masy wód rzecznych.

W XX wieku średni roczny odpływ rzeczny z terytorium Polski wynosił ok. 61,5 km³ (rys. 3). Zatem z 1 km² powierzchni odpływało średnio 5,55 dm³ · s⁻¹, co daje warstwę odpływu równą 175 mm. Uwzględniając przeciętną wysokość opadów równą 629 mm, otrzymamy współczynnik odpływu bliski 28% i średnie parowanie terenowe równe 454 mm.



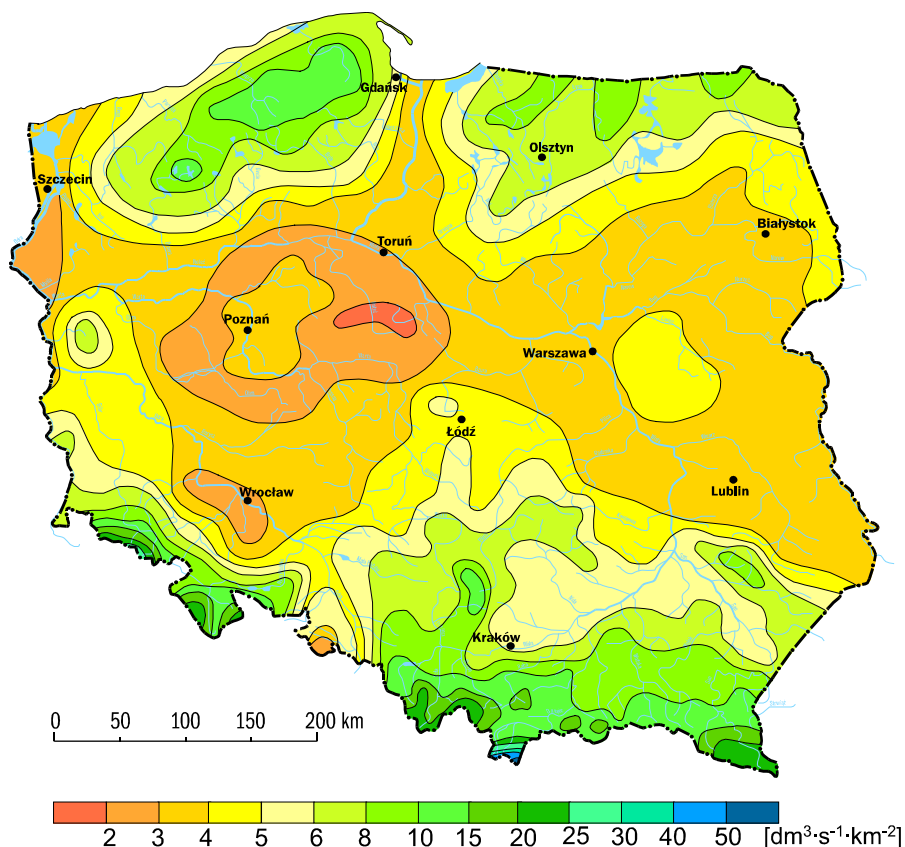
Rys. 3. Krzywe prawdopodobieństwa rocznych sum odpływu całkowitego z obszaru Polski (Fal, 1993)

1 – wyrazy ciągu malejącego, 2 – wyrównanie funkcją rozkładu normalnego, 3 – wyrównanie funkcją rozkładu Pearsona III typu

Wieloletnia zmienność rocznych sum odpływu jest w Polsce dość duża. W roku suchym może odpływać z Polski mniej niż 38 km^3 wody ($p = 99\%$), zaś w roku wyjątkowo wilgotnym odpływ może sięgnąć nawet 100 km^3 ($p = 1\%$). Stosunek obu odpływów prawdopodobnych wynosi ok. 2,6. Jest to wartość dość duża, nawet w skali europejskiej.

Zróznicowanie przestrzenne odpływu w Polsce jest także duże (rys. 4). Najwyższe średnie odpływy jednostkowe występują w wysokich partiach Tatr. Mogą one tam przekraczać nawet $50 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Najmniejsze odpływy średnie notowane są na Kujawach, lokalnie bywają tam niższe niż $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Stosunek tych dwu wielkości wynosi 1 : 25 i obrazuje skalę przestrzennego zróżnicowania całkowitego odpływu rzeczno w Polsce. Analizując zaprezentowaną mapę średniego rocznego odpływu jednostkowego w Polsce, warto wiedzieć, że $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ odpowiadają rocznej warstwie odpływu równej 63 mm, $5 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ to ok. 160 mm, a $20 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ daje 630 mm wody. Upraszczając, warstwę odpływu w milimetrach uzyskujemy mnożąc średni odpływ jednostkowy przez 31,5.

W cyklu rocznym odpływ rzeczny na obszarze Polski ulega zmianom związanym z występowaniem pór roku. Maksima odpływu pojawiają się zwykle na wiosnę, a minima jesienią. Półrocze zimowe (listopad–kwiecień) charakteryzuje się znacznie wyższymi odpływami niż półrocze letnie. Odpływa wówczas ponad 57% ogólnej masy wód odprowadzanych z terytorium kraju w ciągu całego roku.



Rys. 4. Średni odpływ jednostkowy w Polsce (Jokiel, 2004, za IMiGW, poprawione)

Naturalne zasoby wód powierzchniowych Polski, w przeliczeniu na jednego mieszkańca, są równe $1580 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$. Jest to wartość trzy razy mniejsza niż przeciętna dla Europy i ok. 4,5 razy mniejsza od średniej dla świata. Stawia to nasz kraj w grupie państw o najgorszej dostępności do wody. Zasoby realnie dostępne, z gwarancją 95% i po uwzględnieniu przepływów nienaruszalnych, są jeszcze mniejsze i wynoszą przeciętnie ok. $250 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$ na mieszkańca (Zieliński i in., 1996).

Warstwa odpływu, jaką odprowadzają polskie rzeki w czasie wezbrań, zależy od rodzaju wezbrania, wielkości zlewni, a także od jej warunków fizjograficznych i wilgotnościowych. Maksymalne odpływy w czasie wezbrań roztopowych w Polsce nie są zwykle wyższe od 150 mm i dotyczą głównie zlewni nizinnych o powierzchniach bliskich 1000 km^2 . W zlewniach większych lub mniejszych odpływy maksymalne w trakcie takich wezbrań są redukowane. W czasie wezbrań opadowych warstwy odpływu mogą być znacznie wyższe i przekraczać nawet

*Dalsza część książki dostępna w wersji
pełnej.*

