

ZBIGNIEW W. KUNDZEWICZ

*Zakład Badań Środowiska Rolniczego i Leśnego PAN
Bukowska 19, 60-809 Poznań
E-mail: kundzewicz@yahoo.com*

ZMIANY KLIMATU I ZASOBY WODNE

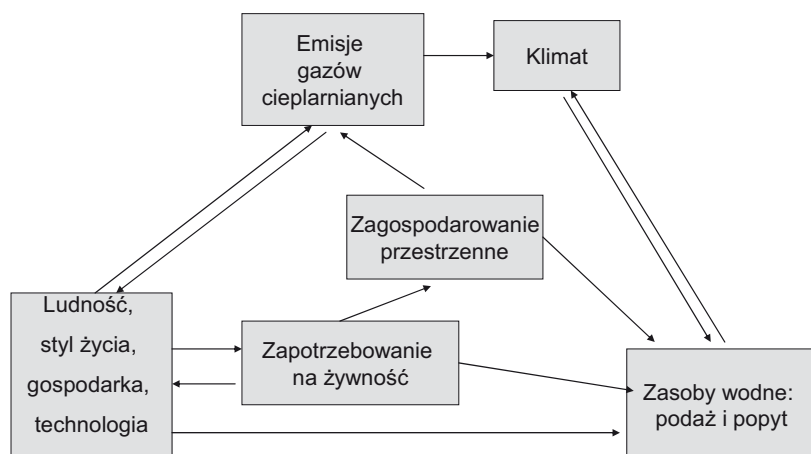
WSTĘP

Choć globalne zmiany klimatu utożsamia się potocznie z globalnym ociepleniem, inne zmienne klimatyczne (np. opad, zachmurzenie, parowanie, szybkość wiatru) też ulegają zmianom. Zmiany zasobów wody słodkiej wydają się, z punktu widzenia konsekwencji, bardziej znaczące niż wzrost temperatury. Ponieważ systemy klimatyczne i systemy wodne są ze sobą ściśle powiązane, każda zmiana w jednym z tych systemów wywołuje zmianę w drugim. Zasoby wody słodkiej są wrażliwe na zmiany wartości średnich zmiennych klimatycznych, a jeszcze bardziej na zmiany ekstremów. Natężenie i dotkliwość trzech problemów związanych z wodą – zbyt dużo wody, zbyt mało wody, zanieczyszczenia wody – mogą wzrosnąć w zmieniającym się klimacie.

Przepływy rzeczne, które stanowią najczęściej stosowaną charakterystykę odnawialnych zasobów wody słodkiej, uległy już

dostrzegalnym zmianom – wzrosły w niektórych regionach świata, a zmalały w innych. Jeszcze silniejsze zmiany są spodziewane w przyszłości.

Liczne sektory i systemy (rolnictwo, leśnictwo, energetyka, transport, przemysł, turystyka, itd.) zależą w znacznym stopniu od dostępności zasobów wodnych. Dlatego zmiany charakterystyk ilościowych opadu, przepływu rzeczno, formowania retencji w jeziorach, wilgotności gleby, procesów zasilania formacji wodonośnej, pokrywy śnieżnej, reżimów hydrologicznych, itd. oraz charakterystyk jakości wody, towarzyszące zmianom klimatu, wywrą silny wpływ na gospodarkę i społeczeństwa. Zmiany klimatu są tylko jednym z czynników, które stanowią wyzwanie dla przyszłej gospodarki wodnej (Ryc. 1). Bardzo wielkie znaczenie mają takie czynniki poza-klimatyczne jak: wzrost liczby ludności i jeszcze silniejszy



Ryc. 1. Schemat powiązań globalnych systemów – człowiek, klimat, gleba, woda (wg KUNDZEWICZA i współaut. 2007).

wzrost poboru wody. Coraz więcej wody jest potrzebne do produkcji żywności dla rosnącej ilości ludzi o coraz wyższych aspi-

racjach co do jakości życia (dotyczy to diety, higieny, rekreacji, itd.).

OBSERWACJE ZMIAN PROCESÓW HYDROLOGICZNYCH

Zmiany wartości strumieni promieniowania na powierzchni Ziemi, kształtujące transport ciepła i masy (wody), mają wpływ na cykl hydrologiczny. Zmiany rozkładu przepływów rzecznych i zasilania podziemnych formacji wodonośnych w czasie i w przestrzeni zależą od zachowania takich zmiennych klimatycznych jak temperatura, parowanie, a przede wszystkim opad atmosferyczny.

Globalnie zaobserwowano wzrost zawartości pary wodnej w cieplejszej atmosferze, a więc puli wody, która może stanowić opad. Na proces opadu atmosferycznego wpływa jednak w istotny sposób szereg czynników, jak cyrkulacja atmosferyczna czy aerozole. Zaobserwowane zmiany opadów zależą w dużym stopniu od horyzontu czasowego jaki bierzemy pod uwagę, a także od położenia danego obszaru. Statystycznie istotny wzrost opadu w XX w. zaobserwowano w znacznej części wysokich szerokości geograficznych półkuli północnej, oraz w Azji Środkowej, a spadki zanotowano m.in. w strefie Sahelu, wokół Morza Śródziemnego, i w południowej Afryce (TRENBERTH i współaut. 2007). W zakresie od 10 do 30°N, opad wzrastał od 1900 r. do lat 1950., ale zmniejszał się od lat 1970. W tropikach, od 10°S do 10°N, opady zmalały, zwłaszcza po 1976–1977. Na znacznych obszarach (np. zachodnia Rosja i południowa Kanada), skład opadów zimowych zmienił się – wzrósł udział deszczu, a zmalał śniegu. Taki efekt dostrzegamy też w Polsce.

Zaobserwowano intensyfikację cyklu hydrologicznego – wzrost częstości występowania opadów intensywnych oraz wzrost liczby dni bez opadu. Wzrosła powierzchnia terenów dotkniętych suszą. Znalezione trendy zmian poziomu jezior i wód gruntowych w dużej mierze zależą od czynników pozaklimatycznych, takich jak: pobór wody przez człowieka, zmiany użytkowania terenu, np. wylesienie i urbanizacja.

Zmiany przepływów rzecznych (niewielki wzrost w ujęciu globalnym, przy silnej zmienności przestrzennej i czasowej) zależą w znacznym stopniu od czynników klimatycznych, a szczególnie opadu. Jednak niektórzy eksperci przypisują pewną część wzrostu

przepływów rzecznych spadkowi ewapotranspiracji roślin – bardziej efektywnemu gospodarowaniu wodą przez rośliny w atmosferze zawierającej wyższe stężenie dwutlenku węgla.

Wyraźnym świadectwem globalnego ocieplenia jest kurczenie się kriosfery (pokrywy śnieżnej, lodu i zmarzliny) z konsekwencjami dla ekosystemów i ludzi. Kriosfera integruje zmienność klimatu i reaguje w sposób bardzo wrażliwy na zmiany klimatyczne i dlatego dynamika jej zasięgu i rozmiaru jest wrażliwym wskaźnikiem zmian klimatu. Co fałają się lodowce górskie. Nieliczne przypadki ekspansji elementów zmarzliny można tłumaczyć wzrostem opadów (tam, gdzie mimo wzrostu temperatura była ciągle ujemna, a wzrosły opady śniegu). Skracą się okresy zlodzenia rzek i jezior. W wielu rzekach, zasilanych z lodowców i z topniejącego śniegu, przepływ wiosenny wcześniej osiąga wartość maksymalną. Topnienie lodowców wpływa na wzrost średnich przepływów rzecznych.

Generalnie zaobserwowano wzrost temperatury wody rzek i jezior, z konsekwencjami dla jakości wody. Zmiany struktury termicznej i chemii jezior wpływają na ich stratyfikację i produktywność, a także na skład gatunkowy, fenologię, zasięg i migrację flory i fauny.

Niemal 70% globalnego użycia wody, a ponad 90% bezzwrotnego poboru wody przypada na nawadniania rolnicze. W większości krajów świata nastąpił wzrost potrzeb wodnych, wskutek wzrostu demograficznego, wzrostu gospodarczego, zmian stylu życia i rozwoju systemów zaopatrzenia w wodę.

Jest oczywiste, że wzrost temperatury wody zmienia szybkość reakcji chemicznych. Wzrost opadów intensywnych wpływa na szybkość erozji i spłukiwania materii do wód powierzchniowych i podziemnych. Przykładem może być powódź na Łabie w 2002 r., kiedy środki ochrony roślin spłukane z pól przez silne opady spowodowały masowe śnięcie ryb. Podczas powodzi na Odrze w 1997 r. do rzek trafiała znaczna ilość nie oczyszczonych ścieków. Jeśli wody jest mniej (np. podczas intensywnych susz), zanieczyszczenia są słabiej rozcieńczone.

PROJEKCJE ZMIAN PROCESÓW HYDROLOGICZNYCH

Opad atmosferyczny, zasadniczy sygnał wejściowy do systemów hydrologicznych, nie jest reprezentowany z dobrą dokładnością w modelach klimatycznych obecnej generacji, a w konsekwencji projekcje na przyszłość, zwłaszcza w skali lokalnej, w której prowadzi się gospodarkę wodną, są niepewne (MILLY i współaut. 2005, NOHARA i współaut. 2006). Projekcje opadu i zmiennych zależnych od opadu (przepływ rzeczny, zasilanie formacji wodonośnych), uzyskane za pomocą różnych modeli klimatycznych, są obciążone znacznie większą dozą niepewności niż projekcje temperatury, które, według wszystkich modeli, zgodnie przewidują wszechobecne ocieplenie. W wysokich szerokościach geograficznych i w części tropików, modele klimatyczne zgodnie symulują kierunek zmian, przewidując wzrost opadu. W niektórych obszarach podzwrotnikowych i w obszarach o średnich szerokościach (np. basen Morza Śródziemnego), modele klimatyczne również zgadzają się co do kierunku zmian, przewidując spadek opadów średnich. Między tymi strefami zgodnego wzrostu i zgodnego spadku opadów leżą obszary o znacznej niepewności projekcji, dla których symulacje z użyciem różnych modeli klimatycznych nie są zgodne nawet co do kierunku zmian.

Projekcje zmian średniorocznego przepływu rzecznoego w dużej mierze odpowiadają projekcjom opadów z wyraźnymi równoleżnikowymi pasami wzrostu lub redukcji przepływów i znacznymi obszarami niezgodności modeli. Analizy średniorocznego przepływu nie odzwierciedlają jednak wahań sezonowych, które mogą być bardzo duże i istotne dla możliwości spełnienia potrzeb wodnych w różnych miesiącach.

Dla zasadniczej części Europy, zakres projekcji wzrostu rocznego opadu w latach 2080–2099 w porównaniu do 1980–1999 (dla 21 modeli) wynosi od 0% do +16%, przy wartości mediany zmian 9%. Rozkład sezonowy zmian nie jest równomierny – według projekcji opady zimowe wzrosną najsilniej (mediana zmian +15%), podczas gdy wartości mediany zmian dla wiosny i jesieni wynoszą odpowiednio +12% i +8%. Jednak projekcje opadu letniego (w okresie od czerwca do sierpnia) i zmiennych zależnych od opadu, uzyskane za pomocą różnych modeli klimatycznych, bardzo się różnią, nawet co do kierunku zmian. Wartość mediany jest nieco

wyższa od zera (wynosząc +2%), ale niektóre modele przewidują wzrost opadów letnich, a inne przewidują spadek.

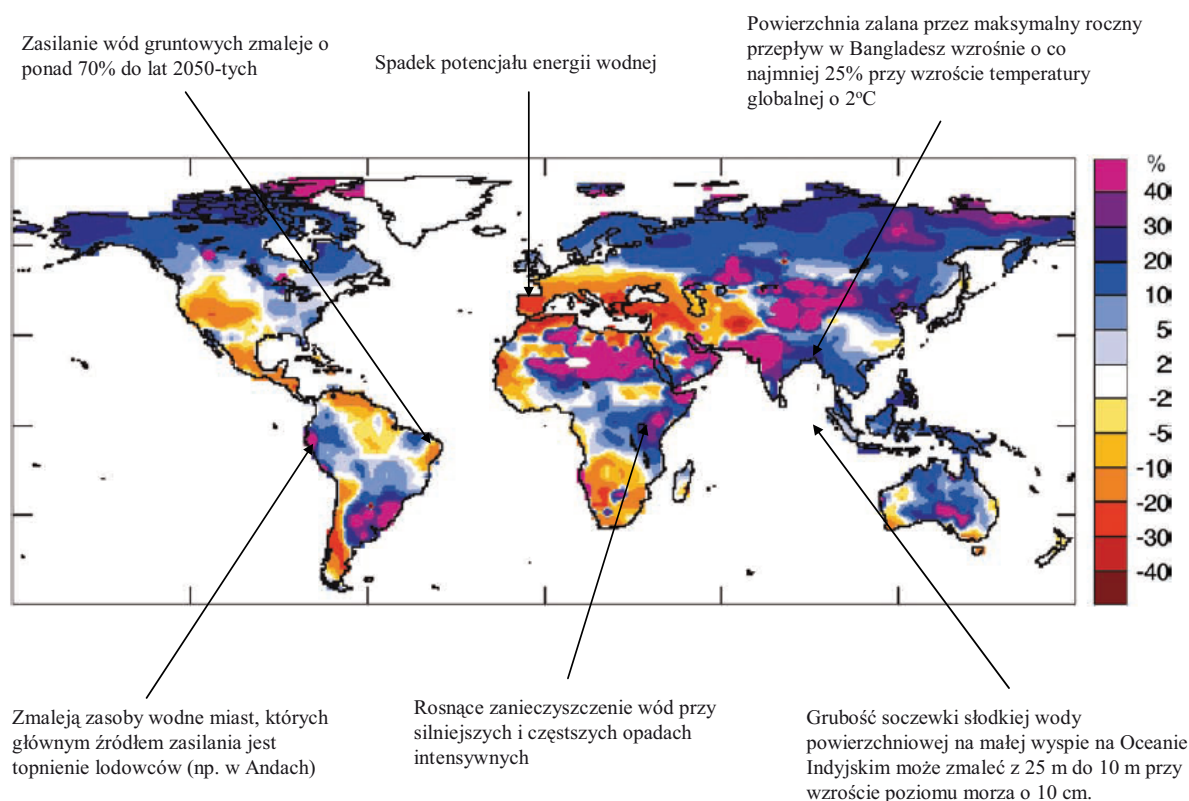
Dla znacznej części Europy projekcje zmian średniego opadu w lecie (czerwiec, lipiec, sierpień) pokazują inny kierunek od projekcji zmian maksymalnego opadu 24-godzinnego. Projekcje wskazują możliwość wzrostu opadów intensywnych nawet tam, gdzie przewidywany jest spadek opadu średniego.

Projekcje na przyszłość orzekają, że ekosystemy poddane będą coraz większemu stresowi wodnemu z powodu czynników związanych z klimatem, takich jak: ekstrema klimatyczne i ich skutki (intensywny opad, powódź, susza, pożar lasu) oraz czynników poza-klimatycznych (antropopresja, zmiana użytkowania terenu, osuszenie terenów podmokłych, zanieczyszczenia, fragmentacja siedlisk, nadmierna eksploatacja).

Podniesienie się poziomu oceanów może spowodować poważne skutki dotyczące zasobów wód słodkich na terenach nadbrzeżnych. Dotyczy to wielkich obszarów, a w szczególności gęsto zaludnionych obszarów deltowych wielkich rzek azjatyckich. Woda morska zaleje nisko położone tereny np. w Bangladeszu i na małych wyspach Oceanu Indyjskiego i Pacyfiku. Wybrzeża, zamieszkałe przez rosnącą liczbę ludzi, narażone będą na rosnące ryzyko postępującego zasolenia formacji wodonośnych, które spotęgowane będzie przez nadmierny pobór wody.

Według projekcji szczególnie wrażliwe są zasoby wodne w suchych i pół-suchych obszarach zwrotnikowych i podzwrotnikowych (np. basen Morza Śródziemnego południowa Afryka, północno-zachodnia Brazylia) z powodu zmniejszających się opadów i wzrostu parowania w cieplejszym klimacie.

Wpływ zmian klimatu na proces przepływu rzecznoego zależy od regionu i sezonu (Ryc. 2). Można oczekiwać wzrostu zmienności odpływu w przestrzeni i w czasie. Ogólny wniosek dotyczący zmienności przestrzennej można sformułować następująco: obszary wilgotne staną się jeszcze bardziej wilgotne, a obszary suche staną się jeszcze bardziej suche. Zmienność czasowa również ulegnie zaostrzeniu – w wielu miejscach pora sucha stanie się jeszcze bardziej sucha, a pora deszczowa może przynieść jeszcze więcej deszczu. Projekcje wskazują, że do połowy



Ryc. 2. Projekcje palących problemów wodnych w zmieniającym się klimacie.

Tło: globalna mapa zmian średniorocznego przepływu rzecznoego dla 2041–2060 w odniesieniu do 1900–1970, w oparciu o 12 modeli klimatycznych (wg KUNDZEWICZA i współaut. 2007, 2008; tło: MILLY i współaut. 2005).

XXI w. średnioroczny przepływ rzeczny i dostępność wody zmniejszy się o 10–30% na obszarach suchych w średnich szerokościach geograficznych i w suchych tropikach, natomiast wzrośnie o 10–40% w wysokich szerokościach i w niektórych wilgotnych obszarach tropikalnych (MILLY i współaut. 2005), a jeszcze bardziej znaczące zmiany nastąpią w dalszych dekadach XXI w. Wiele spośród obecnych obszarów, na których panuje stres wodny, dotknie redukcja zasobów wodnych z powodu zmian klimatu. Dotyczy to zarówno przepływów rzecznych jak i zasilania podziemnych formacji wodonośnych. Mówiąc najkrócej – można oczekiwać, że ekstrema klimatyczne staną się bardziej ekstremalne.

Zmiana fazy opadów zimowych ze śniegu na deszcz, towarzysząca ociepleniu, spowoduje zmianę sezonowości przepływów w rzekach w licznych regionach kontynentalnych i górskich. Zmniejszy się zimowa retencja w pokrywie śnieżnej, a wzrośnie zimowy przepływ rzeczny. Dalsze kurczenie się lodowców i pokrywy śnieżnej spowoduje pogłębienie

się niżówek (niskich przepływów w rzekach) oraz problemów związanych z zaopatrzeniem w wodę mieszkańców szeregu krajów rozwijających się (np. w Ameryce Południowej i Azji), gdzie przepływy rzeczne pochodzą w znacznej mierze z topnienia śniegów i lodów. Topnienie lodowców chwilowo poprawia dostępność wody – przepływy rzeczne rosną, ale maleje ilość wody zgromadzona w tych wielkich zbiornikach, które stworzyła natura. Kiedy lodowce znikną zupełnie, przepływy średnie zmniejszą się, a ich rozkład sezonowy ulegnie niekorzystnym zmianom. Jest to o tyle niepokojące, że ponad miliard ludzi (jedna szósta całej populacji świata) mieszka na terenach zasilanych przez wodę z topniejących śniegów i lodowców z wielkich łańcuchów górskich (Himalaje, Hindukusz i Andy). Lodowce były naturalnym, a więc bezpłatnym, zbiornikiem wody. Jeśli lodowce znikną, dla regulacji przepływu trzeba będzie magazynować wodę np. w nowo zbudowanych sztucznych zbiornikach, ograniczonych stworzonymi przez człowieka kosztowny-

mi zaporami (wprowadzającymi istotne i w znacznej mierze niekorzystne zmiany w środowisku). Bez sztucznego retencjonowania wody, niżówki w lecie i jesieni mogą być bardzo dotkliwe.

Na obszarach, na których zmaleją przepływy rzeczne, zmniejszą się korzyści z zasobów wodnych (dla zaopatrzenia w wodę, ekosystemów, żeglugi, hydroenergetyki, nawodnień rolniczych). Natomiast ewentualne korzyści z projektowanych wzrostów średniego rocznego przepływu rzeczno (np. we wschodniej i południowo-wschodniej Azji) należy widzieć przez pryzmat niekorzystnego wzrostu sezonowej zmienności przepływu (coraz silniejszych, nieregularnych oscylacji wokół trendu). Niekorzystne zmiany w sezonowości, np. monsunów, oznaczają, że w dorzeczu Jangtze, wzrosną przepływy w porze wilgotnej (od maja do września), a zmaleją przepływy w porze suchej. To pierwsze grozi ryzykiem powodzi w porze wilgotnej, a to drugie – problemami z zaopatrzeniem w wodę w porze suchej. Wzrost przepływów w porze wilgotnej nie poprawi sytuacji w porze suchej, jeśli dodatkowej wody nie da się zmagazynować.

Kwestii wpływu zmian klimatu na jakość wody w przyszłości poświęcone jest dość ubogie piśmiennictwo, a większość studiów dotyczy krajów rozwiniętych. Oczekuje się jednak intensyfikacji problemów jakości wody związanych ze wzrostem temperatury, poziomu morza oraz z ekstremami hydrologicznymi (susze i powodzie).

Ponieważ ćwierć całej globalnej populacji (ponad półtora miliarda ludzi) żyje na wybrzeżach (posiadających tylko 10% globalnych odnawialnych zasobów wody słodkiej), a liczba mieszkańców wybrzeży dynamicznie rośnie, przewidywane są poważne problemy w zaopatrzeniu w wodę. Przewidywany nadmierny pobór słodkich wód gruntowych na obszarach nadmorskich będzie wpływał na wkraczanie wód słonych do podziemnych formacji wodonośnych, a w efekcie wzrost zasolenia. Proces ten będzie wzmacniany przez wzrost poziomu mórz. W ten sposób, zasoby wody słodkiej na małych, płaskich i nisko położonych wyspach, np. na Oceanie Indyjskim, radykalnie zmaleją. Soczewki wody słodkiej skurczą się, a więc kosztowne i energochłonne odsalanie pozostanie jedynym sposobem na poprawę niezawodności zaopatrzenia w wodę.

ZMIANY KLIMATU A GOSPODARKA WODNA

Tradycyjnie, systemy wodno-gospodarcze projektuje się i eksploatuje przyjmując wygodne założenie stacjonarności. Oznacza ono, że systemy naturalne podlegają losowym fluktuacjom, które, w sensie statystycznym, nie zmieniają się w czasie. Przyjmuje się więc stałe w czasie (lub okresowe, o naturalnym, jednorocznym okresie) funkcje gęstości prawdopodobieństwa, których używa się do oceny ryzyka, jakiemu poddane są systemy zaopatrzenia w wodę, systemy kanalizacji, systemy osłony przeciwpowodziowej, budowle inżynierii wodnej, np. zapory i hydroelektrownie, siedziby ludzkie i budynki w pobliżu rzek oraz obiekty na terasach zalewowych.

O tym, że stacjonarność procesu przepływu rzeczno nie jest usprawiedliwionym założeniem, zdawali sobie sprawę już od bardzo dawna. Od tysiącleci człowiek wprowadzał bowiem zmiany w zlewniach rzecznych i w samych rzekach. Rozwijał infrastrukturę wodną, budował tamy i zapory, obwałowania, modyfikował koryta, prowadził odwadnianie i nawadnianie, wreszcie zmieniał

użytkowanie terenu i pokrycie powierzchni terenu (wylesienie, rozwój przestrzeny rolnictwa i osadnictwa). Jednak zmiany klimatu uznawano na ogół za pomijalnie małe i nie kłójące się z założeniem, że "przeszłość jest kluczem do przyszłości", które stanowiło podstawę projektowania systemów wodno-gospodarczych. Jeśli obwałowanie przeciwpowodziowe projektowano na poziom tzw. wody 100-letniej (który przekraczany jest średnio raz na sto lat), to nie uwzględniano możliwości, że taki poziom wody może w przyszłości wystąpić (średnio) znacznie częściej lub znacznie rzadziej.

Dostrzegając silną amplitudę i powszechność występowania już zachodzących zmian hydroklimatycznych, a także projekcje przewidujące pojawienie się jeszcze znacznie większych zmian w przyszłości, autorzy artykułu "Stationarity is dead: whither water management?" (Śmierć stacjonarności: dokąd zmierza gospodarka wodna?) (MILLY i współaut. 2008) ogłaszają "śmierć stacjonarności". Założenie stacjonarności nie powinno dalej służyć jako centralny paradygmat w szaco-

waniu i planowaniu ryzyka związanego z gospodarką wodną. Zmiany klimatu wpływają bowiem na wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia ekstremalnych suszy i powodzi, wykraczających poza warunki, jakie znamy z obserwacji.

Wyraźne zmiany antropogeniczne klimatu ziemskiego wpływają na wartości średnie i ekstrema przepływów rzecznych, stanów wody w rzekach i jeziorach, oraz stanów wód gruntowych. Ogólniej, wpływają (obok innych czynników, np. natury społeczno-ekonomicznej) na dostępność wody, a także na potrzeby wodne i użycie wody. Symulacje przyszłych scenariuszy przepływów rzecznych, uzyskane za pomocą matematycznych modeli klimatu, pomimo ciągle istniejącej niepewności, wskazują na znaczne prawdopodobieństwo wystąpienia istotnych zmian zasobów wodnych w różnych regionach. W nowym, cieplejszym klimacie będą wygrani i przegrani. Mieszkańcy terenów, gdzie dziś zasoby wodne są skąpe, a projekcje na przyszłość przewidują jeszcze niższy opad, a wyższą temperaturę (i parowanie), muszą patrzeć w przyszłość z niepokojem. Ale nawet tam, gdzie zasoby wodne wzrosną, wzrost może realizować się poprzez wyższe przepływy rzeczne w porze deszczowej i wyższy potencjał powodziowy, a niższe przepływy w porze suchej. Woda z obfitych opadów spłynie, szybko i bezużytecznie, do morza, niekiedy czyniąc szkody. Nie ma wystarczającej ilości zbiorników, by wodę tę zmagazynować, więc w porze suchej grożą dotkliwe niedobory wody.

W cieplejszej atmosferze mieści się więcej pary wodnej, a cykl hydrologiczny ulega przyspieszeniu. Rośnie więc potencjał intensywnych opadów i ryzyko powodzi oraz silnej erozji i osuwisk.

Zasoby wodne znacznie zmaleją w basenie Morza Śródziemnego, w południowej Afryce, i południowo-zachodniej części Ameryki Północnej (np. w Kalifornii). W tych rejonach można spodziewać się częstszych,

bardziej długotrwałych i bardziej dotkliwych okresów suszy.

Projekcje zmian klimatu stają się bardziej wiarygodne, ponieważ modele coraz lepiej sobie radzą z odtworzeniem sytuacji z przeszłości. Jest bardzo mało prawdopodobne by trendy rocznego odpływu, które już zaobserwowano, zostały wywołane przez zmienność naturalną procesu. Zaobserwowane trendy są zgodne z wynikami modelowania konsekwencji zmian klimatu. Przewidywane zmiany przepływu w ciągu kilkudziesięciu lat czasu życia (funkcjonowania) infrastruktury wodnej, która jest projektowana obecnie, są na tyle silne, że daleko wykraczają poza zakres historycznej zmienności systemów hydroklimatycznych.

Zmiany klimatu wpłyną na praktyki gospodarki wodnej i na zasady eksploatacji istniejącej infrastruktury wodnej (np. zbiorniki). Jest jednak prawie pewne, że rozwiązania przyjęte dla przeszłych warunków nie są właściwą podstawą do projektowania systemów dla zmienionych warunków klimatycznych. Potrzebna jest rewizja procedur projektowych infrastruktury wodnej. Nie bardzo jednak wiadomo jak to zrobić.

Jesteśmy świadkami ogromnego, i to podwójnego, wyzwania – modernizacji, istniejącej i starzejącej się pod względem technicznym, infrastruktury wodnej oraz budowy nowej infrastruktury. Roczne globalne inwestycje w infrastrukturę wodną ocenia się na ogromną sumę ponad 500 miliardów dolarów USA. A jednak, stacjonarność klimatu – “było tak jak będzie” – jest ciągle dominującym założeniem (o marnej jakości). Tylko w niektórych krajach podejmuje się próby uwzględnienia niestacjonarności, np. poprzez użycie trochę “ostrożniejszych” parametrów projektowych, po to, by być po bezpiecznej stronie, jeśli klimat istotnie się zmieni. Jest dobry moment, by ponownie przemyśleć strategię analityczną przy planowaniu tak ogromnych inwestycji, w warunkach niepewnego i zmieniającego się, klimatu.

ADAPTACJA W WARUNKACH SILNEJ NIEPEWNOŚCI

Prawdopodobieństwo niekorzystnych konsekwencji zmian klimatu rośnie wraz ze wzrostem szybkości i amplitudy zmian klimatu (STERN 2006). Dlatego nie wystarcza adaptacja do już zaistniałych skutków zmian klimatu. Potrzebna jest aktywna ochrona klimatu, by negatywne konsekwencje zmian klima-

tu w przyszłości nie przekraczały możliwości adaptacji. Stacjonarności nie można jednak przywrócić. Dalsze ocieplenie jest nieuchronne. Nawet agresywne i globalnie skoordynowane przeciwdziałanie wzrostowi atmosferycznego stężenia gazów cieplarnianych może co najwyżej spowodować spowolnienie

wzrostu temperatury. Gdyby nawet przyjąć nierealne założenie, że poziom emisji gazów cieplarnianych zamrozimy na bieżącym poziomie, ocieplenie będzie postępować. Czas pobytu dwutlenku węgla w atmosferze jest bowiem długi, a system ziemski charakteryzuje się silną bezwładnością cieplną. O spadku temperatury poniżej poziomu, do którego przyzwyczailiśmy się, nie ma zatem mowy. Dlatego w każdym razie potrzebna będzie adaptacja do zmian.

Schematy zmian temperatury, opadu i odpływu są skomplikowane, a niepewność projekcji pozostaje wysoka, mimo osiągniętego postępu w zrozumieniu procesów i modelowaniu matematycznym. Jednak gospodarka wodna może, i powinna, racjonalnie adaptować się do zmieniającego się klimatu. Wraz z postępami nauki o klimacie powiększa się dostępna informacja. Bardzo potrzebny jest (por. MILLY i współaut. 2008) transfer informacji w obie strony: od nauki do praktyki (rozpowszechnianie wiedzy o projekcjach zmian) i od praktyki do nauki (artykułowanie praktycznych potrzeb).

Niepewność projekcji związanych ze zmianami klimatu ma wpływ na praktyki adaptacji w gospodarce wodnej. Po pierwsze, potrzebne są techniki, które nie wymagają precyzji w określeniu zmian np. przepływów rzecznych, czy zasobów wody gruntowej. Po drugie, w oparciu o dotychczasowe rozpoznania nie można precyzyjnie określić konsekwencji różnych polityk ochrony klimatu w dziedzinie zasobów wodnych. Jest oczywiste, że lepsza adaptacja do istniejącej zmienności klimatu (lepsze radzenie sobie z suszami i powodziami) daje lepsze podstawy do adaptacji do przyszłych zmian klimatu. Chociaż nauka nie określa precyzyjnych i wiarygodnych projekcji, w niektórych krajach podjęto kroki w celu uwzględnienia zmian klimatu w praktyce projektowej. Wprowadza się poprawki do procedur projektowych, podwyższając dla bezpieczeństwa obliczony poziom wody 100-letniej o 10%, czy 15%. Na przykład, postanowiono podwyższyć tzw. przepływ projektowy dla Renu w Holandii z 15 000 do 16 000 m³/s przed rokiem 2015, a później planuje się dalsze zwiększenie tej wartości do poziomu 18 000 m³/s, w odpowiedzi na przewidywane zmiany klimatu.

Z uwagi na znaczną dozę niepewności w projekcjach dotyczących wpływu zmian klimatu na zasoby wody słodkiej, specjaliści gospodarki wodnej muszą podejmować decyzje w warunkach znacznej niepewności. Trudno

oczekiwać, że niepewność radykalnie zmaleje w niedalekiej przyszłości, wskutek ulepszania modeli klimatycznych.

Pilnie potrzebna jest poprawa ilościowej estymacji przyszłych konsekwencji zmian klimatu w dziedzinie zasobów wodnych. Brak informacji jest szczególnie krytyczny w krajach rozwijających się. Aby lepiej zrozumieć przyszłe zmiany trzeba analizować długie szeregi czasowe już zebranych obserwacji. Do tego potrzebna jest zdecydowana poprawa monitoringu, a także zapewnienie dostępności do danych. Jednak w wielu krajach panuje tendencja do kurczenia się sieci obserwacyjnych z powodu niedostatecznego finansowania służb hydrologicznych i meteorologicznych. Natomiast obserwacje, które zostały zebrane przez służby i włączone do centralnej bazy danych w wielu krajach, w tym w Polsce, nie są powszechnie dostępne dla nauki. Koszty zakupu takich danych przekraczają często możliwości jednostek naukowych, czy grantów naukowo-badawczych. Dlatego ciągle ukazują się nowe publikacje naukowe bazujące na starych danych do lat 1980., tzn. do końca wydawania roczników meteorologicznych i hydrologicznych. Wtedy nie trzeba było płacić państwowej służbie za udostępnienie zebranych wyników obserwacji. Wystarczyło kupić rocznik. Jednak klimat panujący np. w latach 1951–1980 znacznie różni się od klimatu lat 1971–2000, więc wnioski wyciągnięte na podstawie analizy starych danych mają ograniczoną ważność.

Jeśli w badaniach analizujemy jedynie krótkie szeregi czasowe obserwacji przepływów rzecznych, nie jesteśmy w stanie prawidłowo rozpoznać zmienności naturalnej. Proces detekcji zmian może zatem prowadzić do błędnych wyników (np. do odkrycia „fałszywych” trendów lub braku rozpoznania istniejących trendów). Szczególnie trudno znaleźć długie (i jednorodne) szeregi czasowe informacji o użytkowaniu wody, charakterystyk jakości wody, wody podziemnej, transportu rumowiska, a także zmiennych dotyczących ekosystemów wodnych, na które wpływa nie tylko temperatura, ale też zmienione reżimy przepływu i poziomu wody oraz pokrywy lodowej.

Między mitygacją (przeciwdziałaniem) zmian klimatu i adaptacją do ich skutków istnieją złożone zależności. Niektóre procesy adaptacji do skutków zmian klimatu np. odsalanie wody morskiej, pompowanie głębokiej wody gruntowej, czy procesy uzdatniania wody są bardzo energochłonne, a więc

ich implementacja podwyższa emisję gazów cieplarnianych, poprzez zużycie dużych ilości energii. Z drugiej strony, choć mitygacja zmian klimatu powinna powstrzymać tempo wzrostu temperatury, a więc złagodzić potrzeby adaptacji, niektóre opcje ochrony klimatu (np. produkcja biopaliw, wymagająca znacznej ilości wody) mogą ograniczyć możliwości adaptacji.

Adaptacja do zmian klimatu winna również uwzględniać redukcję innych, nie związanych z klimatem, presji na zasoby wody słodkiej (takich jak np. zanieczyszczenia

wód, czy nadmierny pobór wody do nawodnień rolniczych), jak również poprawę zaopatrzenia w wodę i sanitacji w krajach rozwijających się. Szukanie tzw. współkorzyści ma sens również wtedy, gdy nie znamy precyzyjnie ilościowych konsekwencji zmian klimatu w obszarze zasobów wody słodkiej w skali lokalnej. Zawsze dobrze jest oszczędzać wodę, energię, i surowce, i dbać o rozwój zrównoważony (a więc nie pozbawiać przyszłych pokoleń możliwości korzystania ze źródeł wody, np. głębokiej i nie odnawialnej wody gruntowej).

UWAGI KOŃCOWE

Ocenia się, że zagregowane globalne negatywne konsekwencje zmian klimatu w dziedzinie zasobów wodnych przewyższą spodziewane korzyści (KUNDZEWICZ i współaut. 2007, 2008). Tam, gdzie zmniejszą się opady i zasoby wodne, negatywne konsekwencje są oczywiste. Jednak nawet w niektórych regionach, gdzie przewiduje się wzrost opadów, zmiany rozkładu sezonowego deszczy (więcej opadu w porze wilgotnej, a mniej w porze suchej) nie są korzystne.

Konsekwencje zmian klimatu oraz możliwości efektywnej adaptacji zależą od warunków lokalnych, a więc trudno jest dokonać znaczącej ekstrapolacji wyników, czy wniosków z jednej zlewni na inną.

Według modelowych projekcji ALCAMO i współaut. (2007), stres wodny, zdefiniowany poprzez stosunek średniego poboru wody do odnawialnych zasobów, wzrośnie na 60–75,8% powierzchni lądów, a zmaleje na 19,7–29% powierzchni lądów. Na niektórych obszarach zmiany klimatu złagodzą stres wodny (tam, gdzie opady i przepływy wzrosną silniej niż pobór wody), ale – w układzie globalnym – wzrosty stresu wodnego zdecydowanie górują nad spadkami.

Rycina 2 ilustruje przykłady projekcji palących problemów wodnych w zmieniającym się klimacie, na tle zmian przepływów rzecznych. Konsekwencje zmian klimatu w dziedzinie zasobów wodnych niewątpliwie utrudnią powszechne dążenia do osiągnięcia rozwoju trwałego i zrównoważonego i tzw. celów millenijnych podjęte w 2000 r. Rządy państw świata zobowiązały się podjąć skuteczne działania w celu np. zmniejszenia do połowy globalnej liczby ludzi nie posiadających dostępu do bezpiecznej wody pitnej, czy zmniejszenia do połowy globalnej liczby

ludzi cierpiących głód, do 2015 r. Cele millenijne będą bardzo trudne do spełnienia, gdyż światowe rolnictwo będzie musiało wyżywić rosnącą liczbę ludności, a więc realizacja hasła „more crop from a drop” (więcej plonu z kropli wody) stanie się palącą potrzebą.

Przykłady dramatycznych konsekwencji spadku opadów (przy równoczesnym wzroście temperatury) znajdujemy w Hiszpanii i północno-wschodniej Brazylii (Ryc. 2). Bardzo prawdopodobny jest spadek przepływów rzecznych w basenie Morza Śródziemnego, prowadzący do zmniejszenia się potencjału hydroenergetyki.

Bardziej intensywne opady prowadzić mogą do wzrostu ryzyka powodzi. Szczególnie wrażliwym krajem jest Bangladesz. Około 70% powierzchni tego kraju znalazło się pod wodą podczas katastrofalnej powodzi rzecznej w 1998 r. Silniejsze i częstsze opady intensywne zagrażają również wzrostem zanieczyszczeń wód, np. w części Afryki.

Wzrost temperatury, powodujący topnienie lodowców, doprowadzić może do pojawienia się poważnych problemów w zaopatrzeniu w wodę np. dużych miast zasilanych rzekami spływającymi z Andów. Wreszcie, wzrost poziomu oceanu światowego spowoduje zmniejszanie się zasobów wody słodkiej na nisko położonych wyspach.

W obliczu wyzwań związanych ze zmianami klimatu w przyszłości, warto zaakcentować fakt, że w znacznym stopniu zgadujemy, a nie precyzyjnie szacujemy ilościowo, obecne zasoby wodne. Bez wiarygodnego rozpoznania charakterystyk zasobów wodnych w przyszłości nie jesteśmy w stanie prowadzić prawidłowej gospodarki wodnej, a w szczególności przygotowywać się do zmian klimatu. Sieci obserwacyjno-pomiarowe w wielu

krajach świata kurczą się wskutek zmniejszających się (relatywnie) nakładów, a dane sa-

telitarne mogą jedynie częściowo skompensować redukcję tradycyjnych sieci.

CLIMATE CHANGE AND WATER RESOURCES

Summary

Freshwater resources are among the systems that are particularly vulnerable to climate change. Climate change affects freshwater availability, demand and use. In many areas of the Globe, the three categories of water problems (having too little water, too much water, and water pollution) are exacerbated by climate change. Climate change impacts on freshwater resources are discussed in the context of observations and model-based projections for the future. It is projected that the negative impacts of climate change on freshwater resources and related systems will outweigh its benefits. The climate-driven hydrological changes combine with other pressures on

water resources, such as population growth, land-use change (e.g. urbanization, especially in coastal areas; deforestation) and changes in life styles increasing water demand and environmental pollution, creating a difficult challenge to water management. In addition, there are serious uncertainties in projections of future changes, restricting the anticipative adaptation. In high latitudes and parts of the tropics, climate models are consistent in projecting increase of precipitation and runoff, while in some subtropical and lower mid-latitude regions, they are consistent in projecting decreases of water resources.

LITERATURA

- ALCAMO J., FLÖRKE M., MÄRKER M., 2007. *Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes*. Hydrol. Sci. J. 52, 247–275; doi: 10.1623/hysj.52.2.247
- KUNDZEWICZ Z. W., MATA L. J., ARNELL N., DÖLL P., KABAT P., JIMÉNEZ B., MILLER K., OKI T., ŞEN Z., SHIKLOMANOV I., 2007. *Freshwater resources and their management*. [W:] *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. PARRY M. L., CANZIANI O. F., PALUTIKOF J. P., HANSON C. E., VAN DER LINDEN P. J. (red.). Cambridge University Press, Cambridge, New York, NY.
- KUNDZEWICZ Z. W., MATA L. J., ARNELL N., DÖLL P., JIMÉNEZ B., MILLER K., OKI T., ŞEN Z., SHIKLOMANOV I., 2008. *The implications of projected climate change for freshwater resources and their management*. Hydrol. Sci. J. 53, 3–10.
- MILLY P. C. D., DUNNE K. A., VECCHIA, A. V., 2005. *Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate*. Nature, 438, 347–350.
- MILLY P. C. D., BETANCOURT J., FALKENMARK M., HIRSCH R. M., KUNDZEWICZ Z. W., LETTENMAIER D. P., STOFFER R. J., 2008. *Stationarity is dead: whither water management?* Science 319, 573–574.
- NOHARA D., KITO A., HOSAKA M., OKI T., 2006. *Impact of climate change on river runoff*. J. Hydromet. 7, 1076–1089.
- STERN N. (red.), 2007. *Stern Review: The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- TRENBERTH K. E., JONES P. D., AMBENJE P., BOJARIU R., EASTERLING D., KLEIN TANK A., PARKER D., RAHIMZADEH F., RENWICK J. A., RUSTICUCCI M., SODEN B., ZHAI P., 2007. *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change*. [W:] *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K. B., TIGNOR M., MILLER H. L. (red.). Cambridge University Press, Cambridge, New York, NY.