

Zbigniew Kundzewicz

GLOBALNE ZMIANY KLIMATU I ICH WPŁYW NA EKOSYSTEMY LEŚNE

Wstęp

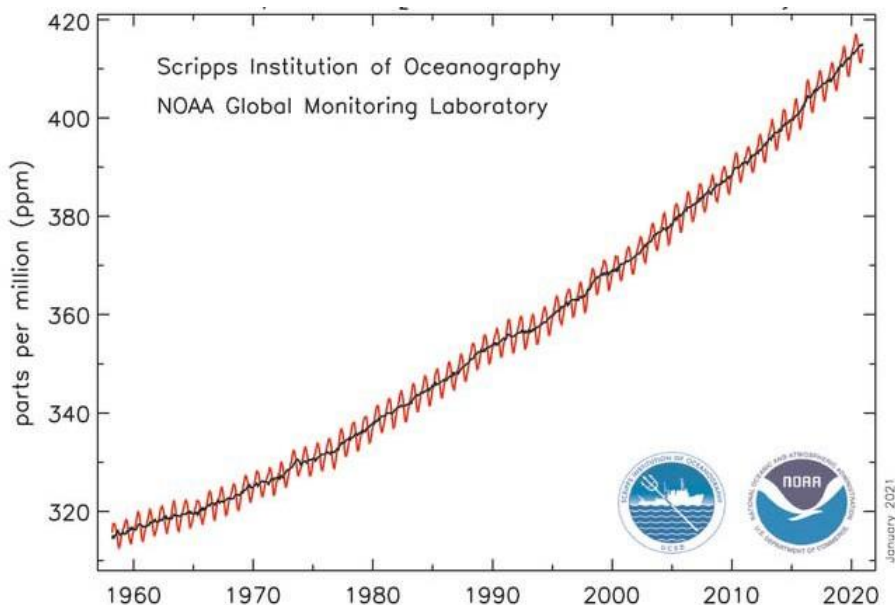
Zmiany klimatu są bardziej regułą niż wyjątkiem. W historii Ziemi okresy chłodniejsze wielokrotnie przeplatały się z cieplejszymi. Mechanizmy zmian klimatu w przeszłości miały naturalny charakter, związany z wahaniami promieniowania słonecznego (aktywność Słońca), zmianą parametrów orbitalnych ruchu Ziemi wokół Słońca (w skali czasu mierzonej tysiącami lat) oraz naturalną zmianą składu ziemskiej atmosfery (np. w wyniku wulkanicznej erupcji pyłów, aerozoli i dwutlenku węgla, czy kolizji ciał niebieskich z powierzchnią Ziemi). Gazy cieplarniane (para wodna, dwutlenek węgla, metan, podtlenek azotu), obecne w atmosferze ziemskiej, mają i zawsze miały znaczny wpływ na klimat naszej Planety.

Istnieją coraz mocniejsze przesłanki ku stwierdzeniu, że zachodząca obecnie zmiana klimatu różni się w istotny sposób od wszystkich wcześniejszych okresów wzrostu temperatury w historii naszej Planety, które wywołane były wyłącznie czynnikami naturalnymi. Zmiany klimatu aż do zakończenia ostatniej epoki lodowcowej odbywały się bowiem bez znaczącej obecności ludzkiej. Podczas wyjścia z ostatniej epoki lodowcowej na całej Ziemi żyło mniej ludzi niż dziś w jednej z kilkadziesiąt wielkich aglomeracji miejskich. Obecnie naszą planetę zamieszkuje 7,8 miliarda ludzi, którzy zużywają coraz więcej energii i drastycznie zmieniają użytkowanie terenu, a w efekcie przekształcając charakterystyki powierzchni Ziemi (np. poprzez urbanizację, wylesienie, odwodnienie mokradeł), które są istotne w procesach przenoszenia masy i energii. Dlatego uzasadnione jest nazywanie naszych czasów epoką antropocenu, w której działania ludzkie dają efekt porównywalny z potężnymi wielkoskalowymi naturalnymi procesami geofizycznymi w przeszłości. Węgiel z zasobów kopalnych, które powstawały w skorupie ziemskiej przez miliony lat, jest obecnie uwalniany do atmosfery w ogromnych ilościach w postaci gazu cieplarnianego – dwutlenku węgla – w skali czasowej dziesięcioleci. W wyniku spalania coraz większych ilości węgla, ropy i gazu rośnie stężenie gazów cieplarnianych w atmosferze, wzmacniając efekt cieplarni-

niany, a to przekłada się na wzrost temperatury i – szerzej – zmianę klimatu.

Podczas konferencji stron Konwencji Klimatycznej w Paryżu w grudniu 2015 przyjęto porozumienie stawiające za cel polityki klimatycznej: utrzymanie wzrostu średniej globalnej temperatury na poziomie znacznie poniżej 2°C ponad wartość przedindustrialną i kontynuowanie wysiłków na rzecz ograniczenia wzrostu temperatury do 1,5 stopnia.

Badania z użyciem modeli matematycznych wzmacniają argumenty o antropogenicznym podłożu obecnych zmian klimatu. Przy uwzględnieniu wymuszeń naturalnych (zmiany aktywności słonecznej, erupcje wulkanów) oraz antropogenicznych (wzrost atmosferycznych stężeń gazów cieplarnianych i wzrost, a potem spadek zawartości aerozoli w atmosferze oraz zmiany lesistości) jesteśmy w stanie odtworzyć, używając modeli, zasadnicze cechy zaobserwowanego przebiegu temperatury globalnej. Natomiast zakładając wyłącznie wymuszenia naturalne, nie jesteśmy w stanie wytłumaczyć wzrostu temperatury w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat. Skoro modele matematyczne nieźle radzą sobie z interpretacją zasadniczych zmian i wahań klimatu, jakie już zaobserwowano w okresie ostatniego stulecia, można ich użyć do wnioskowania o przyszłości.



Ryc. 1. Długi szereg czasowy atmosferycznego stężenia CO₂ w obserwatorium Mauna Loa (Hawaje, USA), według danych UCSD (Uniwersytet Kalifornijski San Diego) / NOAA (Narodowa Administracja Oceaniczna i Atmosferyczna), USA.

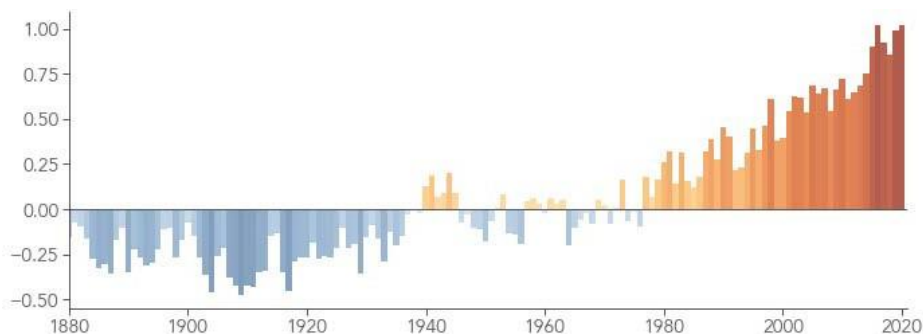
Źródło: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

Dwutlenek węgla jest najbardziej istotnym składnikiem atmosfery z punktu widzenia zmian efektu cieplarnianego. Człowiek ma bowiem tylko niewielki wpływ na stężenie pary wodnej, gdyż dominuje naturalny proces parowania wody z oceanów. Natomiast bilans dwutlenku węgla, a w konsekwencji – jego stężenie w atmosferze w znacznym stopniu zależy od człowieka. Bilans nie jest zrównoważony. Ilość emitowanego dwutlenku węgla przekracza jego wiązanie (sekwestrację), więc atmosferyczne stężenie CO₂ wyraźnie rośnie w czasie, prowadząc do intensyfikacji efektu cieplarnianego, przy czym co roku następują wyraźne wahania sezonowe. W sezonie wegetacyjnym roślinność wbudowuje CO₂ w swoją masę, a później, kiedy spadną liście, dwutlenek węgla nie jest już asymilowany, natomiast wraca do atmosfery z opadłych, butwiejących liści (rys. 1).

Obserwacje zmian

Obserwacje wyraźnie pokazują, że od kilkudziesięciu lat zachodzi globalne ocieplenie. Każde z ostatnich czterech dziesięcioleci było globalnie cieplejsze niż poprzednie. Każdy kolejny rok z ostatnich 19 lat (od roku 2001 włącznie) należy do 20 najcieplejszych globalnie lat w historii obserwacji. Obserwowane zmiany temperatury i efekty towarzyszące są bez precedensu w skali czasu od dziesięcioleci do tysiącleci. Atmosfera i ocean ociepliły się, zmniejszyła się ilość śniegu i lodu na Ziemi, natomiast wzrósł poziom morza.

Istnienie trendu wzrostowego temperatury globalnej nie ulega wątpliwości. Nie oznacza to jednak, że każdy rok jest cieplejszy od poprzedniego (rys. 2). Zarejestrowano trzy kolejne rekordy temperatury globalnej w trzech



Ryc. 2. Przebieg anomalii temperatury globalnej w latach 1880–2020, względem średniej z okresu referencyjnego 1951–1980, według danych NASA (Narodowa Administracja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej), USA.

Źródło: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/147794/2020-tied-for-warmest-year-on-record>

kolejnych latach: 2014, 2015, 2016. Każdy rok z siedmioletniego okresu od 2014 do 2020 należał do zbioru siedmiu najcieplejszych globalnie lat w historii obserwacji temperatury. Silny trend ocieplenia widać też w Polsce, a niekiedy zdarzają się niezwykle rekordy. Na przykład, w czerwcu 2019 roku w Poznaniu zanotowano wystąpienie aż 12 dni z temperaturą maksymalną przekraczającą 30 stopni. Temperatura maksymalna osiągnęła jednego dnia 38 stopni, a innego 37. To był czerwiec nie z tej ziemi.

Na Grenlandii zanotowano w lecie 2019 temperaturę w wysokości aż 23 stopnie Celsjusza. W efekcie lądolód grenlandzki topił się bardzo intensywnie. Poziom morza był względnie stabilny przez tysiące lat, ale od stulecia wyraźnie rośnie. Z jednej strony cieplejsza woda (mamy bowiem ocieplenie, którego końca nie widać) zajmuje więcej miejsca, a z drugiej strony przyspiesza tempo topnienia kriosfery dostarczając wodę podwyższającą poziom oceanów. W efekcie, tempo wzrostu poziomu mórz przyspiesza wraz z ociepleniem – obecnie notuje się roczny przyrost o 5 mm.

Ciekawe jest porównanie przestrzennego występowania susz meteorologicznych w Europie w ostatnich 60 latach. Okazuje się, że istnieje wyraźna prawidłowość: wilgotna północ kontynentu staje się jeszcze bardziej wilgotna, a suche południe – jeszcze bardziej suche. Polska leży pośrodku, a więc sygnał nie jest tak silny jak na północy (gdzie wilgotno), czy na południu (gdzie sucho). W Polsce wystąpił ostatnio dwuletni okres silnego niedoboru opadów 2018–2019, a w roku 2020 dała się we znaki susza wiosenna z rekordowo niską miesięczną sumą opadów w kwietniu (Pińskwar i in., 2020).

Ważną rolę w rozpowszechnianiu informacji na temat zmian klimatu odgrywają media. Nie zawsze wiadomości są rzetelne. Napisałem przed 20 laty artykuł zatytułowany: „Ciepło, coraz cieplej” (Kundzewicz, 2001). Nie był to jednak wówczas typowy tytuł. Jeśli w Polsce lat 2000-tych kwestie klimatyczne przebijały się na okładkę tygodnika, to raczej z bałamutnym przesłaniem, zapowiadającym ochłodzenie (rys. 3). W lecie roku 2003, kiedy niezwykle silna i długotrwała fala upałów spowodowała w Europie 55 tysięcy dodatkowych zgonów, okładka *Polityki* wieściła nową epokę lodową z podtytułem „Naukowcy ostrzegają przed wielkim ochłodzeniem”. Naukowcy ostrzegają? W istocie bezpodstawnie „ostrzegają” jeden naukowiec, profesor nauk medycznych, autor raportu *Polityki*. Z kolei okładka *Polityki* w roku 2008 informowała „Będzie zimniej”. Jednak ciągle, od wielu dziesięcioleci, postępuje wszechobecny wzrost temperatury, nawet jeśli od czasu do czasu może się zdarzyć chłodniejszy dzień, miesiąc, czy rok. Zwiastunów zapowiadanego ochłodzenia klimatu ciągle nie widać, a wręcz przeciwnie – silny trend ocieplenia jest wyraźnie widoczny w szeregu rocznej temperatury globalnej (rys. 2). Wokół rosnącego trendu obserwujemy jednak odchylenia

temperatury globalnej, czasem w dół, a czasem w górę, z tym, że mechanizm tych odchyłeń rozumiemy dość dobrze. Sterują nimi oscylacje w systemie ocean-atmosfera (zob. Kundzewicz i in., 2020b). Dziś takich okładek jak na rys. 3 już raczej nie ma, a do ich opisu użylibyśmy teraz terminu *fake news*.



Ryc. 3. Dezinformujące okładki Polityki, bezpodstawnie wieszczące oziębienie.

Projekcje zmian

Projekcje na przyszłość wskazują na dalsze, wszechobecne ocieplenie. Jednak działania człowieka mogą wywrzeć wpływ na tempo i amplitudę wzrostu temperatury. Wzrastające rozmiary ocieplenia zwiększają prawdopodobieństwo poważnych, wszechobecných i potencjalnie nieodwracalnych skutków. Wśród kluczowych zagrożeń klimatycznych można postrzegać ryzyko pogorszenia stanu środowiska, utraty różnorodności biologicznej oraz świadczeń, funkcji i usług ekosystemów, które zapewniają utrzymanie życia.

Przewidziany jest wzrost intensywności opadów podczas dni deszczowych w Polsce i wartości maksymalnych opadów dobowych w półroczu letnim. Wzrośnie też liczba kolejnych, następujących po sobie, dni bezopadowych (tzn. z opadem dobowym nie wyższym niż 1 mm) w półroczu letnim.

Zmniejszy się natomiast liczba dni w roku z pokrywą śnieżną. Oczywiście, czasem będzie mogła wystąpić zima mroźna i śnieżna, ale prawdopodobieństwo wystąpienia takiej sytuacji będzie coraz niższe.

Projekcje przyszłych opadów w Polsce sugerują znaczny wzrost opadów zimowych (jednak częściej w postaci deszczu, a nie śniegu), podczas gdy opady letnie mogą wzrosnąć niewiele, a niektóre modele wskazują wręcz na ich redukcję. Można więc oczekiwać, że zima przeobrazi się w chłodną porę deszczową, a lato będzie często gorące i suche, przy czym długie okresy bezdeszczowe będą przerywane silnymi ulewami. Istnieją przesłanki do obawy, że w zmieniającym się klimacie Polski, ekstrema pogodowe – fale upałów, intensywne deszcze, silne wiatry – staną się bardziej ekstremalne.

Zaistnienie i wielkość przyszłych zmian klimatu i ich konsekwencji zależą od scenariusza rozwoju społeczno-ekonomicznego, który ma wpływ na emisje gazów cieplarnianych, oraz od realizowanej polityki przeciwdziałania zmianom klimatu.

Projekcje przyszłej temperatury rocznej i sezonowej pokazują wszechobecne ocieplenie w Polsce, we wszystkich regionach i we wszystkich porach roku. Amplituda ocieplenia zależy od horyzontu czasowego i od scenariusza emisji gazów cieplarnianych, ale wygląda na to, że wiosna może stać się bardzo ciepła, a więc za kilkadziesiąt lat po cieplejszej zimie przejdziemy od razu do czegoś, co obecnie uznajemy za lato. Tak byłoby w odległym horyzoncie czasowym (koniec XXI wieku) i w niedobrym scenariuszu emisji (RCP8.5), oznaczającym niepowodzenie starań podejmowanych przez społeczność międzynarodową dla przeciwdziałania globalnym zmianom klimatu.

Skutki zachodzących zmian klimatu mogą być lokalnie korzystne lub niekorzystne, ale spojrzenie globalne pokazuje, że przeważają negatywy. Nawet jeśli w Polsce oszczędzimy na opale podczas cieplejszych zim, stracimy więcej energii na klimatyzację podczas nasilających się letnich fal upałów.

W roku 2008 byłem współautorem ważnego artykułu w czasopiśmie *Science*, zatytułowanego „*Stationarity is dead: whither water management*” (Milly i in., 2008). Artykuł proklamuje kres stacjonarności. Projekcje na przyszłość pokazują, że – z reguły – średni odpływ rzeczny będzie rósł w regionach, gdzie już jest wysoki, a będzie malał tam, gdzie jest niski. Obszary suche staną się więc w przyszłości jeszcze bardziej suche, a wilgotne będą jeszcze bardziej wilgotne. To nie jest dobra wiadomość np. dla basenu Morza Śródziemnego.

Samaniego i in. (2018) przewidują, że antropogeniczne ocieplenie zwiększy w przyszłości powierzchnię obszarów suszy glebowej w Europie, a przy trzystopniowym ociepleniu prawdopodobieństwo tak wielkiej suszy jak w 2003 roku wzrośnie dwukrotnie, a więc taka susza wyraźnie spowszednieje.

Istnieje mądre powiedzenie taoistycznego filozofa: „Jeśli nie zmienisz kierunku, dotrzesz tam, dokąd zmierzasz”. A dokąd zmierza ludzkość? No właśnie, zmierzamy do jeszcze cieplejszego klimatu, w którym jeszcze znacznie wzrosnie topnienie lodolodów Grenlandii i Antarktydy oraz lodowców górskich. Przez to dramatycznie podniesie się poziom morza i jest to, długofalowo, największe zagrożenie spośród skutków obecnej zmiany klimatu. Gdyby przyjąć, że utrzyma się obecne tempo wzrostu poziomu morza, to w ciągu 10 lat poziom morza wzrósłby już o 5 cm, a w ciągu 100 lat – o 50 cm. Jest jednak niemal pewne, że w ciągu 100 lat wzrost znacznie przekroczy 50 cm, bo szybkość wzrostu poziomu mórz rośnie wraz z ociepleniem. W Bangladeszu, nisko położonym i gęsto zaludnionym kraju (o powierzchni ponad dwukrotnie mniejszej od Polski, a liczbie ludności ponad czterokrotnie większej), już metrowy wzrost poziomu morza będzie powodował ogromne perturbacje, bo woda zaleje ogromne obszary. W razie pięciometrowego wzrostu poziomu morza, Dhaka, stolica Bangladeszu, położona obecnie w głębi lądu, daleko od brzegu Oceanu Indyjskiego, stanie się portem oceanicznym. A konsekwencje w Polsce? Nie ulega wątpliwości, że wraz z ociepleniem, problemy związane ze wzrostem poziomu morza będą nasilać się na polskim wybrzeżu. Obawiamy się wzrostu amplitudy i częstotliwości wezbrań sztormowych. Długofalowe perspektywy dla Żuław, Helu i Mierzei Wiślanej, ale też pięknych piaszczystych plaż na całym polskim wybrzeżu Bałtyku, są dramatyczne. Wzrost poziomu morza o 4 metry sprawiłby, że Hel stanie się wyspą. No i trzeba byłoby bardzo bronić Żuław, bo inaczej je stracimy. Taki 4-metrowy wzrost wcale nie jest abstrakcją. Gdyby stopił się cały lodolód Grenlandii, to poziom mórz podniósłby się o ponad 6 metrów. Natomiast w przypadku wzrostu poziomu morza o 60 metrów (np. gdyby stopił się lodolód zarówno Grenlandii jak i Antarktydy) pod wodą znalazłaby się ogromna część północnej i zachodniej Europy, w tym znaczna część Polski (Popkiewicz i in., 2018). Przyszłe pokolenia miałyby więc do czynienia z istnym potopem. Na szczęście to się może zdarzyć w bardzo odległej przeszłości – w perspektywie tysięcy lat.

Wpływ zmian klimatu na ekosystemy leśne (obserwacje i projekcje)

Obserwacje

Zmiany klimatu wpływają na ekosystemy leśne na wiele sposobów, przy czym można wyróżnić efekty bezpośrednie i pośrednie. Do tych pierwszych należy korzystny wpływ wzrostu atmosferycznego stężenia dwutlenku węgla

i wzrostu długości sezonu wegetacyjnego na produkcję pierwotną roślinności i przyrost drzew, a także na efektywność wykorzystania zasobów (wody i składników pokarmowych).

Zmiany klimatu wpływają na strukturę ekosystemów i na szereg charakterystyk organizmów i populacji, takich jak – liczebność, biomasa, rozmiar, wzorce rozmieszczenia i charakterystyki osobników. Wraz z ociepleniem, owady są w stanie wyprowadzić większą liczbę gradacji, co powoduje potrzebę większego zużycia środków ochrony roślin oraz terminowego zwalczania szkodników. Wzrost temperatury ma także wpływ na interakcje gatunków, a nawet poziomów troficznych w ekosystemie, na zmiany liczebności ofiar, drapieżników oraz ich siedlisk. Niektóre obce gatunki inwazyjne mają cechy, które sprzyjają ich przetrwaniu i rozmnażaniu się w zmieniającym się klimacie.

W związku z ociepleniem klimatu obserwuje się wyraźne zmiany fenologiczne – wcześniejsze nadejście wiosny biologicznej, wcześniejszy rozwój liści, pojawianie się pąków, rozkwitanie kwiatów, i owocowanie. Ciągłe istnieje jednak ryzyko wiosennych przymrozków, które powodują szkody. Wcześniej pojawiają się wiosenne motyle, rozmnażają żaby, przylatują ptaki wędrowne. Desynchronizacja fenologii powoduje możliwość zaburzeń w układzie drapieżnik-ofiara. Konsekwencje dla fenologii mają też zmiany pokrywy śnieżnej i lodowej, związane z ociepleniem.

Teoria i eksperymenty sugerują, że zmiana ekologiczna wynikająca ze zmienionych reżimów zakłóceń może przejawiać się raczej jako stosunkowo nagłe i przestrzennie niejednolite przejścia w strukturze, składzie i funkcji ekosystemu, a nie stopniowe i przestrzennie jednolite zmiany lokalizacji lub liczebności gatunków.

Wzrost częstotliwości lub intensywności zaburzeń ekosystemu, takich jak susze, burze wiatrowe, pożary i ogniska szkodników, wykryto w wielu częściach świata, a w niektórych przypadkach przypisuje się je zmianom klimatycznym. Zmiany w reżimie zaburzeń ekosystemu poza zakresem naturalnej zmienności mogą zmienić strukturę, skład i funkcjonowanie ekosystemu. Niektóre gatunki są wypierane ze swoich siedlisk (część z nich może wyginać), z powodu zmieniających się warunków klimatycznych, podczas gdy inne gatunki korzystają i ulegają ekspansji. Ptaki wędrowne są szczególnie narażone na zagrożenie ze względu na silną zależność ich migracji, żerowania, wzrostu i rozmnażania od warunków pogodowych.

Do efektów pośrednich wpływu zmian klimatu na ekosystemy leśne należą: zmiany składu gatunkowego lasów, odpowiadające zmianom temperatury i opadu. Już zaobserwowano wiele przypadków przesuwania się zasięgu występowania gatunków flory i fauny (np. ptaków, owadów i motyli)

w kierunku odpowiedniego klimatu (w poszukiwaniu właściwych temperatur), a więc ku biegunom (w kierunku na północ, na półkuli północnej) i na wyższe wysokości (ku wierzchołkom wzniesień). Zakres migracji jest jednak ograniczony przez działania człowieka. Zaobserwowano zmiany zasięgu występowania gatunków inwazyjnych, szkodników i chorób roślin. Zmianę klimatu i ekspansję gatunków inwazyjnych uznaje się za główne przyczyny utraty różnorodności biologicznej. Inwazyjne gatunki obce są dużym zagrożeniem dla endemicznej bioróżnorodności. Znaczną część Europy, w tym Polskę, doświadcza plaga szrotówka kasztanowcowiaczka (*Cameraria ohridella*), który przywędrował z południa, z cieplejszego klimatu. Zasięg kleszcza (*Ixodes ricinus*) w Szwecji przesunął się wyraźnie na północ, a w Czechach na wyższe wysokości.

Wiele zdrowych lasów na świecie jest narażonych na zwiększone ryzyko pożarów związanych z ociepleniem klimatu. Powierzchnia lasów borealnych, które spłonęły w Ameryce Północnej i na Syberii, znacznie wzrosła. W 2019 r., podczas niezwykle gorącej i suchej pogody na znacznych obszarach Półkuli Północnej miały miejsce ogromne pożary – od Morza Śródziemnego aż po Arktykę. Średnia temperatura czerwca w regionach Syberii, gdzie szalały pożary, była o prawie dziesięć stopni wyższa od czerwcowej średniej wieloletniej. Temperatury na Alasce osiągały rekordowe wartości, ponad 30°C, podsycając pożary wzdłuż koła podbiegunowego.

W wielu miejscach na świecie zaobserwowano zwiększoną śmiertelność drzew, przypisywaną zmianie klimatu. Zamieranie lasów jest poważnym zagrożeniem środowiskowym, które ma potencjalnie duży wpływ na klimat i korzyści z ekosystemów (usługi ekosystemowe) – bioróżnorodność, produkcję drewna, ilość i jakość wody, oraz działalność gospodarczą. W badaniach regionalnych w zachodniej i borealnej Ameryce Północnej zaobserwowano wzrost śmiertelności drzew w ciągu ostatnich kilku dziesięcioleci, przypisywany skutkom wysokich temperatur i suszy lub zmianom w rozmieszczeniu i liczebności szkodników i patogenów związanych z ociepleniem.

Ekosystemy podlegają różnym czynnikom stresu. Zmiany klimatu mogą być jednym z nich, ale wśród istotnych czynników współistniejących trzeba wymienić antropopresję, zanieczyszczenia powietrza, wody i gleby, nadmierną eksploatację, fragmentację i degradację środowiska, a także wprowadzenie obcych gatunków. Zmiany klimatu mogą wzmacniać te niekorzystne zmiany. W wielu miejscach świata zmniejsza się powierzchnia zajmowana przez lasy, a także liczba gatunków żywych organizmów i różnorodność biologiczna (Kundzewicz i Kowalczak, 2008). Po podróży do Brazylii, Al Gore (były wiceprezydent USA) stwierdził, że uciszamy tysiące pieśni ptaków, zanim je usłyszymy. Powiedział obrazowo (choć może niekoniecznie ściśle),

że na każdej mili kwadratowej Amazonii występuje więcej gatunków ptaków niż w całej Ameryce Północnej (Kundzewicz, 2000). A właśnie powierzchnia dziewiczej puszczy tropikalnej Amazonii zmniejsza się niepokojąco z winy człowieka. Realizowana tam polityka: „wycinaj i wypalaj” źle służy środowisku i klimatowi światowemu. Zmniejsza się możliwość wiązania węgla przez roślinność, a spalane drewno jest źródłem emisji CO₂ do atmosfery.

Projekcje

Prawdopodobnie wydajność produkcji leśnej istotnie wzrośnie w przyszłości, gdyż rośliny w atmosferze bogatszej w dwutlenek węgla będą fotosyntetyzowały bardziej intensywnie. Wzrost produkcji leśnej będziemy także zawdzięczać coraz dłuższemu sezonowi wegetacyjnemu i łagodniejszym ziomom. Natomiast niekorzystny wpływ na produkcję roślinną w wielu regionach Europy, w tym Polski, może mieć jednak niedobór wody.

Przewiduje się, że w perspektywie kilkudziesięciu lat zmiana klimatu będzie silnym stresem dla ekosystemów leśnych, zwłaszcza w scenariuszach silnego ocieplenia. Jednak przy scenariuszu niskiego bądź umiarkowanego ocieplenia, bezpośrednia ewolucja pokrycia terenu może być zasadniczym czynnikiem napędzającym zmiany ekosystemów, dominującym nad efektami klimatu i maskującym je.

W przyrodzie nastąpią jednak znaczne zmiany – migracje w poszukiwaniu odpowiedniego klimatu. Zasięg występowania wielu roślin i zwierząt przesunie się w kierunku biegunów i ku wyższym wysokościami. Możliwość migracji zwierząt i roślin jest istotnie ograniczona. Tempo zmiany klimatu w krajobrazie może przekroczyć maksymalną prędkość, z jaką wiele grup organizmów może rozproszyć się lub migrować (z wyjątkiem bliskiego horyzontu czasowego i „łagodnego” scenariusza emisji gazów cieplarnianych). Wiele gatunków nie będzie mogło migrować dostatecznie szybko przy ociepleniu o kilka stopni w ciągu stulecia. Populacje gatunków, które nie nadążą za swoją niszą klimatyczną, znajdują się w niekorzystnym klimacie, nie mogąc dotrzeć do obszarów o potencjalnie odpowiednim klimacie. Gatunki zamieszkujące rozległe, płaskie krajobrazy są szczególnie narażone, ponieważ muszą rozproszyć się na większe odległości, w porównaniu z gatunkami w regionach górskich, aby dotrzymać kroku zmianie klimatu. Bariery rozprzestrzeniania się, takie jak fragmentacja siedlisk, wcześniejsze zajęcie siedlisk przez konkurujące gatunki oraz przeszkody spowodowane przez człowieka (np. zapory na rzekach i obszary zurbanizowane na lądzie) zmniejszają zdolność gatunków do migracji do bardziej odpowiednich stref klimatycznych. W wędrówce gatunków ku szczytom gór, migrująca roślina

napotkać może bariery, np. dochodząc do miejsca, gdzie warunki klimatyczne nie są odpowiednie, albo nie ma gleby. Wreszcie – migrująca roślina może napotkać wierzchołek wzniesienia, a temperatura wciąż jeszcze jest zbyt wysoka. Migracja gatunków w stronę biegunów (tzn. na północ, na półkuli północnej), też jest ograniczona – np. pasmem gór nie do pokonania, czy – jak w Polsce – wybrzeżem Morza Bałtyckiego. Zdolność wielu gatunków do reagowania na zmiany klimatu będzie ograniczona czynnikami pozaklimatycznymi, w tym między innymi jednoczesnym występowaniem „nieprzyjawnego” użytkowania gruntów, fragmentacją i utratą siedlisk, konkurencją z gatunkami obcymi, a także ekspozycją na nowe szkodniki oraz patogeny. Przyszłe przemieszczanie się gatunków na obszary, na których w przeszłości nie występowały, będzie nadal napędzane głównie przez zwiększone możliwości rozprzestrzeniania się związane z działalnością człowieka oraz zakłócenia, niekiedy ułatwione i promowane przez zmianę klimatu. Celowy i przypadkowy transport realizowany przez człowieka może przyspieszyć rozprzestrzenianie się gatunków inwazyjnych (Settele i in., 2014).

Regionalne konsekwencje zmiany klimatu mogą się znacznie różnić. Może wzrosnąć produktywność leśna w północnej Europie (efekt tzw. „nawożenia” dwutlenkiem węgla w lasach i wzrostu długości sezonu wegetacyjnego, choć wzrosnąć może zagrożenie szkodnikami i chorobami), ale w basenie Morza Śródziemnego spodziewany jest spadek produkcji pierwotnej i wzrost zagrożenia suszą i pożarami. Ciepłejsze i bardziej suche scenariusze klimatyczne w południowej Europie sugerują możliwość pogorszenia się warunków glebowych.

Projekcje na przyszłość orzekają, że ekosystemy poddane będą coraz większemu stresowi z powodu zmian klimatu, w sensie zmian wartości średnich i ekstremów pogodowych (intensywny opad, powódź, susza, pożar lasu i wichury), w połączeniu z innymi czynnikami pozaklimatycznymi (zmiana użytkowania terenu, zanieczyszczenie, fragmentacja siedlisk, nadmierna eksploatacja). Niektóre konsekwencje zmian klimatu w biosferze są już nieuniknione, nawet przy niewielkim ociepleniu. Globalnie, do tej kategorii należą: blednięcie i zamieranie koralu; zmiany zasięgu występowania gatunków; wzrost ryzyka pożarów lasów i wiatrołomów; a także szkody w nadmorskich ekosystemach spowodowane wzrostem poziomu mórz.

Duża część gatunków lądowych jest narażona na zwiększone ryzyko wyginięcia w wyniku przewidywanych zmian klimatycznych, zwłaszcza, gdy zmiana klimatu oddziałuje z innymi stresorami. Ryzyko wyginięcia wzrasta wraz z intensywnością i tempem zmiany klimatu. Zmiany klimatu spowodują spadek różnorodności biologicznej również w obszarach o wysokiej endemicznej bioróżnorodności. Zagrożona jest różnorodność biologiczna,

zwłaszcza tam, gdzie istnienie niektórych siedlisk (np. tereny podmokłe, tundra i siedliska izolowane) jest w niebezpieczeństwie. Utrata siedlisk zagraża rzadkim i endemicznym gatunkom, które tam żyją i ptakom wędrownym. Globalne wymieranie gatunków będzie nieodwracalną stratą znacznej liczby gatunków roślin i zwierząt, jeszcze w XXI w. Prawdopodobny jest spadek korzyści, jakie ekosystemy zapewniają człowiekowi. Jeśli korzyści z ekosystemów ulegać będą dalszej degradacji, to globalne osiągnięcie tzw. millenijnych celów rozwoju będzie problematyczne.

Przewiduje się zmiany reżimów pożarów lasów, strat spowodowanych wiatrolomami i występowania szkodników, również możliwość większej liczby gradacji owadów w cieplejszym klimacie, w tym – kornika drukarza. Istnieje możliwość przekroczenia tzw. krytycznych progów, powyżej których negatywne skutki drastycznie rosną, co może prowadzić do osiągnięcia nowych stanów równowagi. Słabe jest jednak zrozumienie skali czasowej odpowiedzi ekosystemów na wymuszenia (być może nawet w grę wchodzi stulecia i tysiąclecia, zanim ustaliłby się nowy stan równowagi) i słabe zrozumienie stanów przejściowych (nieustalonych).

Dla wszystkich scenariuszy zmian klimatycznych na drugą połowę XXI wieku, skład społeczności zmienia się w wyniku spadku liczebności niektórych gatunków i wzrostu innych, a sezonowa aktywność wielu gatunków może się zmieniać w różny sposób, zaburzając cykle życiowe i interakcje między gatunkami (np. w układzie drapieżnik-ofiara).

Produktywność leśna w Polsce może wzrosnąć w efekcie „nawożenia” dwutlenkiem węgla i wzrostu długości sezonu wegetacyjnego, choć zwiększyć się może także zagrożenie szkodnikami i chorobami, suszą i pożarami. Na skutek zmian klimatycznych (wzrostu temperatury i zmiany wilgotności) z wysokim prawdopodobieństwem może dojść do znacznych zaburzeń w drzewostanach, w tym zmiany składu gatunkowego, a być może nawet całkowitej utraty niektórych gatunków.

Dyderski i in. (2018) dokonali kwantyfikacji oczekiwanych zmian zasięgu wybranych gatunków drzew leśnych. Z powodu zmian klimatycznych może znacznie zmienić się skład gatunkowy drzew w polskich lasach. „Przegranymi” będą gatunki drzew, które dzisiaj zajmują niemal 75 % powierzchni lasów w Polsce: przede wszystkim sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris*), zajmująca 58% powierzchni lasów, świerk pospolity (*Picea abies*), modrzew europejski (*Larix decidua*) oraz brzoza brodawkowata (*Betula pendula*). Te obecnie najczęściej występujące w Polsce gatunki drzew są najbardziej zagrożone i mogą zniknąć z większości zajmowanych przez siebie stanowisk, a wraz z nimi – wiele gatunków roślin, grzybów, i zwierząt. W nowym klimacie lepiej poradzi sobie jodła pospolita (*Abies alba*), buk zwyczajny

(*Fagus sylvatica*), jesion wyniosły (*Fraxinus excelsior*), dąb szypułkowy (*Quercus robur*) i dąb bezszypułkowy (*Quercus petraea*). „Zwycięzcami” będą też gatunki obce, jak daglezwia zielona (*Pseudotsuga menziesii*), dąb czerwony (*Quercus rubra*), i grochodrzew (*Robinia pseudoacacia*).

Mitygacja i adaptacja

Intensyfikację efektu cieplarnianego można ograniczyć przez skuteczne i zharmonizowane działania w skali globalnej. Skoro działalność człowieka odpowiada za przeważającą część obecnego ocieplenia, to poprzez właściwe ludzkie działania, podjęte dostatecznie wcześnie, można ograniczyć ocieplenie w przyszłości. Wielu niekorzystnych konsekwencji można by uniknąć, osłabić je, czy też opóźnić, poprzez wdrożenie skutecznej polityki zapobiegania zmianom klimatu. Trzeba wpłynąć na skład ziemskiej atmosfery, na dach „naszej ziemskiej cieplarni” w taki sposób, żeby efekt cieplarniany nie nasilał się. Trzeba więc ograniczać atmosferyczne stężenie gazów cieplarnianych. Potrzebne są działania w różnych sektorach, a w szczególności w tych, które są w wysokim stopniu odpowiedzialne za znaczną emisję gazów cieplarnianych. Jeśli jednak globalne emisje gazów cieplarnianych będą dalej rosły, skutki ocieplenia mogą przybrać niebezpieczny rozmiar. Zmiany klimatu i ich konsekwencje wymagają podjęcia działań w każdej skali, od lokalnej do globalnej, i to dwojakiego rodzaju – mitygacji (przeciwdziałania ociepleniu) i adaptacji do jego skutków.

Dlaczego ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i zmian klimatu jest takie ważne? Przeciwdziałanie zmianom klimatu, które mogą prowadzić do wielu niekorzystnych skutków, jest jednym z najpoważniejszych wyzwań, przed jakimi stoi ludzkość w bieżącym stuleciu. Globalne ocieplenie nie ulega wątpliwości, a zasadniczą jego przyczyną jest wywołany przez człowieka wzrost stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze. Istnieje uzasadnione naukowo powiedzenie, że obecnie żyje pierwsze pokolenie, które zdało sobie sprawę z powagi ryzyka klimatycznego i które jest jednocześnie ostatnim pokoleniem, mogącym zmienić niekorzystny bieg wydarzeń.

Wszystkie kraje świata powinny redukować emisje gazów cieplarnianych, bo atmosfera nie zna granic między państwami, a liczy się globalny efekt. Musimy starać się utrzymać wzmocnienie efektu cieplarnianego w bezpiecznych granicach. Unia Europejska jest liderem globalnej polityki klimatycznej, podejmującym zdecydowane wysiłki w kierunku odwęglenia energetyki i uzyskania zerowego salda emisji dwutlenku węgla już w połowie XXI wieku.

Poprawa efektywności użycia energii (według starego sloganu – „kilowaty nie na straty”) jest najtańszą formą zapobiegania ociepleniu. Wzrostowi

gospodarczemu nie musi towarzyszyć wzrost zużycia energii. Od roku 1980, Dania osiągnęła 70% wzrost produktu krajowego brutto, a zużycie energii pozostaje na tym samym poziomie. Ale poprawa efektywności nie wystarczy. Potrzeba znacznie więcej – przede wszystkim „odwęglenia” energii, tzn. stosowania takich źródeł energii, które nie powodują emisji dwutlenku węgla. Jednak tego nie da się zrobić szybko – jeszcze przez wiele lat paliwa kopalne będą odgrywały ważną rolę w zaspokojeniu rosnącego popytu globalnego na energię. Dotyczy to szczególnie spodziewanego wzrostu zużycia energii w krajach, które rozwijają się dynamicznie – w Chinach, Indiach, Brazylii, RPA i Meksyku. Jednym z pomysłów na ograniczenie emisji jest „łapanie” dwutlenku węgla w elektrowniach węglowych i składowanie go w formacjach geologicznych (technologia CCS, *carbon capture and storage* – ang. wychwytywanie i składowanie węgla). Jest to jednak trudne, drogie, i ryzykowne. Natomiast z rozłożoną emisją CO₂ może sobie poradzić roślinność, wiążąc dwutlenek węgla z atmosfery, przyroda może do pewnego stopnia wykonać pracę za nas. Wolumen naturalnego wiązania dwutlenku węgla przez ekosystemy lądowe znacznie przewyższa naturalne wiązanie węgla przez oceany.

Globalna powierzchnia lasów sięga 31% światowej powierzchni lądów. Zmiany powierzchni lasów w ostatnich dekadach obejmują zalesienie w krajach klimatu umiarkowanego i wylesienie w tropikach. Wylesienie było bardzo intensywne w latach 1990-tych (areal rzędu 16 mln ha rocznie), ale stopniowo malało do wartości 10 mln ha rocznie, w latach 2015–2020. Wylesienie realizuje się głównie poprzez zamianę powierzchni leśnych na pola uprawne i pastwiska oraz tereny pod osadnictwo. Jednak istnieje również sterowany proces zalesiania, a także zalesianie samoistne, więc globalna strata netto powierzchni leśnych jest mniejsza. Prawie 90% lasów w krajach uprzemysłowionych uprawia się planowo, ale nie jest tak w krajach rozwijających się. Ponieważ lasy odgrywają bardzo ważną rolę w przeciwdziałaniu globalnemu ociepleniu, więc powinno nam zależeć na ich jak największej powierzchni i jak najlepszej jakości. Potencjał drzew i lasów w wychwytywaniu dwutlenku węgla z atmosfery jest duży i może znacząco wesprzeć działania zmierzające do łagodzenia kryzysu klimatycznego przez redukcję emisji gazów cieplarnianych.

Spośród ekosystemów lądowych, ekosystemy leśne są największymi magazynami węgla, które pochłaniają znaczne ilości atmosferycznego CO₂ w procesie fotosyntezy. Część zasymilowanego węgla jest przechowywana w biomasie roślin (nadziemnej i podziemnej), w martwym drewnie, ściółce, a także w glebie. Dla niemal każdego typu lasu, w glebie leśnej jest znacznie więcej węgla niż w roślinności. Wyjątkiem są lasy tropikalne, gdzie węgla jest tylko nieco więcej w glebie niż w roślinności.

Węgiel zmagazynowany w ziemskiej biosferze może migrować do atmosfery w wyniku bezpośrednich i pośrednich skutków zmiany klimatu, wylesiania i degradacji. Globalnie, wiązanie węgla w ekosystemach lądowych ciągle jeszcze przewyższa emisję. Jednak projekcje na przyszłość nie są optymistyczne. Przewiduje się, że transfer netto CO₂ z atmosfery do łąd zmniejszy się w XXI wieku. Ocenia się, że jeszcze w drugiej połowie XXI w. biosfera lądowa może stać się źródłem węgla netto.

Eksperymenty i badania modelowe sugerują, że wzrost atmosferycznego stężenia dwutlenku węgla do około 600 ppm będzie nadal zwiększał fotosyntezę i efektywność wykorzystania wody przez rośliny, ale w tempie malejącym; a niska dostępność składników odżywczych, zwłaszcza azotu, ograniczy reakcję wielu naturalnych ekosystemów na wzrost atmosferycznego stężenia CO₂. Prawdopodobnie, również inne czynniki związane ze zmianami klimatu, w tym wysokie temperatury, rosnące stężenia ozonu, a w niektórych miejscach susze, zmniejszą produktywność roślin kompensując korzystny efekt przyrostu stężenia CO₂.

Przewiduje się, że same zmiany klimatu nie doprowadzą do nagłej i rozległej utraty pokrywy leśnej w Amazonii w obecnym stuleciu, ale przewidywany wzrost liczby epizodów silnej suszy, wraz ze zmianą użytkowania gruntów i pożarami lasów, może spowodować, że znaczna część lasów amazońskich przekształci się w mniej gęste ekosystemy, przystosowane do suszy i pożarów, a tym samym narażając duże zasoby bioróżnorodności na podwyższone ryzyko, a jednocześnie zmniejszając pochłanianie węgla z atmosfery. Znaczne ograniczenie wylesiania, a także szersze stosowanie skutecznego zarządzania pożarami, zmniejszyłoby ryzyko nagłej zmiany w Amazonii, a także skutki tej zmiany dla światowego klimatu.

Gdy ekosystemy lądowe ulegają znacznym zmianom (pod względem szaty roślinnej, biomasy, fenologii lub dominacji grup roślin), w efekcie zmian klimatu, lub w wyniku zmian nie-klimatycznych (np. przekształcenie użytkowania terenu w areał rolniczy lub pod osadnictwo), klimat też ulega zmianie. Szybszy rozkład ściółki w cieplejszych warunkach spowoduje, że oczekiwanie dodatkowej możliwości magazynowania węgla może okazać się złudne. Sprzężenie zwrotne między ekosystemami lądowymi, a klimatem obejmuje, między innymi, zmiany wartości albedo powierzchni, wielkości ewapotranspiracji oraz emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych. Istnieje duże ryzyko, że wysoka amplituda i tempo zmiany klimatu związane z wysokimi scenariuszami emisji gazów cieplarnianych spowodują nagłą i nieodwracalną zmianę składu, struktury i funkcji ekosystemów, na przykład w Amazonii i Arktyce, co wywoła znaczną dodatkową zmianę klimatu, z powodu istnienia dodatnich sprzężeń zwrotnych. Cząsteczki dymu unoszące się pod-

czas pożarów lasów północnych mogą osiadać na śniegu i lodzie w Arktyce, powodując pochłanianie światła słonecznego (które w przeciwnym razie byłoby odbite), przyspieszając ocieplenie. Pożary w Arktyce zwiększają również ryzyko rozmarzania wiecznej zmarzliny, które uwalnia metan – silny gaz cieplarniany. Obawiamy się więc wzrostu mobilizacji metanu przez emisje ze zmarzniętej powierzchni tundry pokrytej wieczną zmarzliną. Emisje te już rosną i będą rosły jeszcze szybciej wraz z ociepleniem. Zaoberwowano schemat dodatniego sprzężenia zwrotnego w układzie temperatura – metan. W subarktyce syberyjskiej migracja gatunków przyczynia się do kolejnego ocieplającego sprzężenia zwrotnego. Na przykład, modrzewie zrzucające igły są zastępowane wiecznie zielonymi drzewami iglastymi o ciemnych liściach, pochłaniających część promieniowania słonecznego, które wcześniej odbijało się od pokrywy śnieżnej pod drzewami pozbawionymi igieł. Zmiana klimatu przekształci skład gatunkowy, pokrycie terenu, zmniejszy zasięg i powierzchnię wiecznej zmarzliny systemu borealnego i tundry. Zmniejszy także wartość albedo, a zwiększy uwalnianie gazów cieplarnianych. Drzewa i krzaki wkroczą na tereny pokryte obecnie przez północną tundrę, a drzewa liściaste wchodzić będą na obszary porośnięte obecnie borami iglastymi.

Powierzchnia lasów w Polsce wzrosła znacząco od czasów drugiej wojny światowej, niemal o połowę z 21% w roku 1945 do 30% w roku 2017. Wzrasta także średnia zasobność drzewostanów. Zapas węgla w żywej biomacie drzew w Polsce wzrósł z 467 mln ton w 1990 r. do 822 mln ton w 2015 r. (Duszyński i in., 2019). Te wartości nie uwzględniają węgla zmagazynowanego w glebie i ściółce, a jest to największy i najtrwalszy rezerwuuar węgla w ekosystemach leśnych.

W lipcu 2019 premier Mateusz Morawiecki przedstawił inicjatywę zwiększenia wiązania emisji dwutlenku węgla w Polsce przez posadzenie 500 milionów drzew do końca roku 2019. Jednak jeśli sadzimy młode drzewka na miejscu dużych, wyciętych, drzew, retencja dwutlenku węgla w lesie zmniejsza się, a nie zwiększa, a więc pożądany efekt klimatyczny nie nastąpi.

Ponieważ jednak zmiana klimatu już zachodzi i będzie zachodziła w przyszłości, potrzebna jest też adaptacja do jej nieuniknionych skutków. Adaptacja autonomiczna systemów naturalnych do pewnego stopnia dzieje się sama. Adaptuje się biosfera, np. poprzez zmiany zasięgu geograficznego flory i fauny w odpowiedzi na zmianę klimatu.

Celowa adaptacja do zmian klimatu jest dziś ważnym obszarem działań człowieka. Trzeba optymalnie „zagospodarować”, czyli wykorzystać zmiany korzystne; a skutecznie zaadaptować się do zmian niekorzystnych. Gospodarka leśna wymaga długofalowego planowania, a więc sadzenia takich

drzew, którym będą odpowiadać przyszłe warunki klimatyczne. W decyzjach dotyczących nasadzeń powinno się więc uwzględniać przewidywane zmiany klimatu i związane z nimi zmiany zasięgów geograficznych poszczególnych gatunków drzew. Jak wskazują Duszyński i in. (2019), należy „uniknąć błędów przeszłości, m.in. sadzenia dużych połaci monokultur i stosowania tradycyjnych metod odnawiania naruszających strukturę gleby.”

Środki adaptacyjne podejmowane przez człowieka nie będą jednak w stanie zapobiec istotnym zmianom w ekosystemach borealno-arktycznych. Powszechnie znane są prognozy redukcji liczebności niedźwiedzi polarnych wraz z kurczeniem się powierzchni arktycznego lodu morskiego. Ten ważny zagrożony gatunek może stanąć na krawędzi wyginięcia już za kilkadziesiąt lat.

Zarówno ekosystemy leśne, jak i zadrzewienia wpływają na ilość i retencję wody z opadów atmosferycznych. Chronią glebę przed erozją oraz ograniczają dobowe i sezonowe wahania temperatury. Stanowią też naturalną ochronę przed niszczycielską siłą wiatrów. Te funkcje adaptacyjne są nie mniej ważne niż pochłanianie i magazynowanie węgla. W dobie powszechnie dominujących monokultur w uprawach rolniczych, a także wysokiej produkcji (w istocie nadprodukcji) żywności w Europie i konieczności wyłączenia części areałów spod uprawy, warto poważnie rozważyć ideę kształtowania zadrzewień śródpolnych. Ukształtowana przez gen. Dezyderego Chłapowskiego w pierwszej połowie XIX w. sieć zadrzewień śródpolnych w okolicach Turwi w Wielkopolsce różnicowała krajobraz rolniczy. Zadrzewienia śródpolne generują wielorakie korzyści. Wpływają pozytywnie na warunki mikroklimatyczne i hydrologiczne. Osłabiają wiatry, chronią przed erozją wietrzną, ograniczają wzrost temperatury gleby i powietrza, stymulują ewapotranspirację, dłuższe zaleganie pokrywy śnieżnej i poprawę retencyjności wodnej. Pasy zadrzewień śródpolnych wpływają też korzystnie na różnorodność biologiczną. Struktura krajobrazu zawierająca pasy zadrzewień przeciwdziała fragmentacji ekosystemów. Stanowią zadrzewione korytarze ekologiczne, łączące tereny leśne, którymi może migrować fauna. Zadrzewienia śródpolne można także traktować jako skuteczną barierę biogeochemiczną ograniczającą ruch związków chemicznych w krajobrazie rolniczym w kierunku cieków wodnych. Obserwuje się pozytywny wpływ zadrzewień śródpolnych na chemizm wód gruntowych i powierzchniowych, uwidoczniający się przez redukcję masy składników odżywczych (azotu i fosforu) dopływających do wód. Także strefy buforowe w postaci pasów roślinności wokół wód powierzchniowych redukują erozję i transport materiału erodowanego, zatrzymując biogeny. Ukształtowanie zadrzewień śródpolnych korzystnie oddziałuje na ważne w globalnym ujęciu wiązanie dwutlenku węgla. Jest więc również działaniem ograniczającym, choć w mikroskali, wzrost stężenia

gazów cieplarnianych w atmosferze. Zadrzewienia śródpolne służą więc zarówno przeciwdziałaniu zmianom klimatu, jak i adaptacji do jego skutków.

Uwagi końcowe

Obserwacje wyraźnie pokazują, że od kilkudziesięciu lat zachodzi globalne ocieplenie. Nauka wyraźnie wskazuje, że mechanizm obecnego ocieplenia różni się w sposób zasadniczy od wszystkich wcześniejszych epizodów wzrostu temperatury w historii naszej Planety. W wyniku spalania coraz większych ilości węgla, ropy i gazu rośnie stężenie gazów cieplarnianych w atmosferze, wzmacniając efekt cieplarniany, a to przekłada się na wzrost temperatury i inne efekty zmiany klimatu. Projekcje na przyszłość wskazują na dalszy wzrost temperatury, w każdej skali czasowej i przestrzennej, ale działania człowieka mogą wywrzeć wpływ na tempo i amplitudę ocieplenia. Wzrastające rozmiary ocieplenia zwiększają prawdopodobieństwo poważnych, wszechobecnych i potencjalnie nieodwracalnych skutków. Zmiany klimatu wpływają na ekosystemy leśne na wiele sposobów, bezpośrednich i pośrednich. Produktywność leśna w Polsce może wzrosnąć w efekcie „nawożenia” dwutlenkiem węgla i wzrostu długości sezonu wegetacyjnego. Jednak zwiększyć się może także zagrożenie szkodnikami i chorobami, suszą i pożarami. Na skutek zmian klimatycznych (wzrostu temperatury i zmiany wilgotności) z wysokim prawdopodobieństwem może dojść do znacznych zaburzeń w drzewostanach, w tym zmiany składu gatunkowego, a być może nawet całkowitej utraty niektórych gatunków. Zmiany klimatu mogą spowodować, że wśród ważnych gatunków drzew leśnych w Polsce będą zwyczajny i przegrani. W ciągu kilku dziesięcioleci, z uwagi na deficyt wody w sezonie wegetacyjnym, klimat w Polsce może stać się mniej optymalny dla wysoce produktywnych gatunków leśnych, które obecnie mają w kraju dominujące znaczenie. Dotyczy to w szczególności sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) i świerka pospolitego (*Picea abies*). Istnieje ryzyko, że zmieniający się klimat okaże się nieoptymalny dla drzew sadzonych obecnie w ramach zalesień, czy odnowień i że drzewa te mogą nie przetrwać kilkudziesięciu lat.

Literatura

1. Duszyński, J.; Grzywacz, A.; Jagodziński, A.M.; Kojs, P.; Kujawa, K.; Zabielski, R. Ratujmy las, on chroni nas. *Polityka* nr 37 (3227), 56–58, 11.09–17.09.2019
2. Dyderski, M.K., Paź, S., Frelich, L.E., Jagodziński, A.M. (2018) How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology* 24(3), 1150–1163, <https://doi.org/10.1111/gcb.13925>

3. Kundzewicz, Z.W. (2001) Ciepło, coraz cieplej, *Wiedza i Życie*, nr 7/2001, 50–53.
4. Kundzewicz, Z. W., Kowalczak, P. (2008) *Zmiany klimatu i ich skutki*. Wyd. Kurpisz, 206 str.
5. Milly, P.C.D.; Betancourt, J.; Falkenmark, M.; Hirsch, R.M.; Kundzewicz, Z.W.; Lettenmaier, D.P.; Stouffer, R.J. (2008) Stationarity is dead: whither water management? *Science*, 319, 573–574.
6. Pińskwar, I.; Kundzewicz, Z.W.; Choryński, P. (2020) Severe drought in the spring of 2020 in Poland-More of the same? *Agronomy*, 10, 1646; doi:10.3390/agronomy10111646
7. Popkiewicz, M.; Malinowski, Sz.; Kardaś, A. (2018) *Nauka o klimacie*. Warszawa, Wydawnictwa: Post Factum, Wydawnictwo Sonia Draga, Wydawnictwo Nieoczywiste, ISBN 978–83–8110–659–7 str. 544
8. Samaniego, L.; Thober, S.; Kumar, R.; Wanders, N.; Rakovec, O.; Pan, M.; Zink, M.; Sheffield, J.; Wood, E.F.; Marx, A. (2018) Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change* 8, 421–426, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0138>
9. Settele, J., R. Scholes, R. Betts, S. Bunn, P. Leadley, D. Nepstad, J.T. Overpeck, and M.A. Taboada, 2014: Terrestrial and inland water systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 271–359.

Prof. dr hab. Zbigniew Kundzewicz
Instytut Środowiska Rolniczego i Leśnego PAN,
Bukowska 19, 60–809 Poznań
kundzewicz@yahoo.com

Referat z sesji naukowej nt.: "Sylwan- dwa wieki historii leśnego czasopisma naukowego" oraz "Wyzwania dla gospodarki leśnej w warunkach globalnych zmian w środowisku" z okazji 120 Zjazdu Delegatów Polskiego Towarzystwa Leśnego w Katowicach, 08-11.09.2021 r.