

WPŁYW PRZEWIDYWANYCH ZMIAN KLIMATU NA STĘŻENIA I DEPOZYCJE SO_x W EUROPIE ŚRODKOWO-WSCHODNIEJ

Magdalena REIZER¹, Katarzyna JUDA-REZLER¹, Wojciech TRAPP²

¹Politechnika Warszawska, Wydział Inż. Środowiska, Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

²Ekometria Sp. z o.o., Orfeusza 2, 80-299 Gdańsk

magdalena.reizer@is.pw.edu.pl

STRESZCZENIE

W celu analizy wpływu prognozowanych zmian klimatycznych na stężenia i depozycje związków siarki (SO_x) dla obszaru Europy środkowo-wschodniej przeprowadzono wysokorozdzielcze długoterminowe symulacje systemem modelowania zbudowanym z regionalnego modelu klimatu (RegCM3), oryginalnego modelu emisji (EMIL) i modelu jakości powietrza trzeciej generacji (CAMx). Wyniki przeprowadzonych symulacji prognozują niewielki wzrost nad Europą środkowo-wschodnią stężeń SO₂ w horyzoncie czasowym do roku 2100, a także wzrost depozycji SO_x w obszarach górskich oraz jej spadek w części centralnej i wschodniej Polski. Prognozy wskazują także na nieznaczną zmianę liczby dni oraz godzin w ciągu roku kalendarzowego ze stężeniami SO₂ przekraczającymi wartość dopuszczalną. Największe zmiany widoczne są w pobliżu dużych źródeł emisji.

1. Wprowadzenie

Obserwowane w ostatnich latach, a także prognozowane zmiany klimatu stały się poważnym wyzwaniem ochrony środowiska naszej planety. Jakość powietrza atmosferycznego istotnie zależy od parametrów klimatu, a równocześnie wpływa na bilans radiacyjny atmosfery. W związku z tym matematyczne modelowanie jakości powietrza i klimatu staje się niezbędnym narzędziem badawczym, jak również niezwykle potrzebnym instrumentem wspomagania polityki ochrony środowiska.

Modele jakości powietrza (*Air Quality Models*, AQM) należą do grupy narzędzi informatycznych, rozwijanych od lat 50. XX w. Dynamika i chemia zjawiska rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze jest nader skomplikowana, a jej matematyczny opis jest zawsze opisem uproszczonym. Istniejące modele AQM prezentują bardzo szerokie spektrum metod modelowania. Przede wszystkim różnią się bazową budową modelu i przyjętymi założeniami upraszczającymi, stosowanym forsowaniem meteorologicznym oraz zastosowanymi schematami numerycznymi. W grupie AQM są zarówno modele bardzo proste, jak modele Gaussowskie, typu Pasquilla, oparte na analitycznym rozwiązaniu bazowego równania dyfuzji atmosferycznej i klimatologicznych danych meteorologicznych jak i bardzo skomplikowane Eulerowskie modele fotochemiczne, modele tzw. trzeciej generacji, będące potężnymi systemami modelowania, składającymi się z grupy modeli współpracujących ze sobą. Aktualnie najszerzej stosowanymi na świecie modelami fotochemicznymi trzeciej generacji są opracowane w USA modele CAMx (*Comprehensive Air quality Model with extensions*) i CMAQ (*Community Multi-scale Air Quality*). Modele te tworzą systemy modelowania z modelem meteorologicznym, najczęściej jest to mezoskalowy model meteorologiczny MM5 [1], oraz z modelem emisji, na przykład z modelem SMOKE [2]. Porównanie wyników takich systemów modelowania zostało przedstawione przez Tesche i in. [3].

Wyniki modelowania są często wykorzystywane do wspierania decyzji o ogromnym znaczeniu ekonomicznym i poważnych konsekwencjach dotyczących zdrowia mieszkańców i środowiska przyrodniczego. W związku z powyższym, bardzo istotnym elementem modelowania jest oszacowanie jego niepewności. Jak wskazują wyniki eksperymentów związanych z modelowaniem jakości powietrza, niepewność w szacowaniu emisji zanieczyszczeń ma największy wpływ na niepewność wyników modelowania [4].

Mimo znacznej redukcji emisji zanieczyszczeń do atmosfery w krajach rozwiniętych (Ameryka Północna, Unia Europejska) w ostatnim dwudziestoleciu, jakość powietrza atmosferycznego w skali świata nie uległa proporcjonalnej poprawie i nadal jest wysoce niezadowolająca, zwłaszcza w miastach [5]. Powodem takiego stanu rzeczy jest istotny udział w zanieczyszczeniu powietrza zanieczyszczeń wtórnych, na których stężenia w atmosferze, poza wielkością emisji, w istotny sposób wpływają parametry meteorologiczne.

Klimat w XXI wieku będzie, z wysokim prawdopodobieństwem, znacząco różny od tego w XX wieku. Podejmowane inicjatywy i działania międzynarodowe, przede wszystkim w ramach Ramowej Konwencji ONZ ds. Zmian Klimatu, mają na celu zredukowanie negatywnych globalnych zmian klimatu, ale zmiany te, według obecnej wiedzy, są nieuniknione. Dla wszystkich prognoz rozwoju społeczeństw świata, w których pogoda i klimat odgrywają kluczową rolę, niezbędne są scenariusze zmian klimatycznych, opracowane dla dużych rozdzielczości przestrzennych.

Prognozy klimatu opracowywane są przy pomocy globalnych modeli klimatycznych (GCM – *Global Climate Model/General Circulation Model*). Obecnie powszechnie wykorzystywane są globalne modele cyrkulacji atmosfera-ocean, będące najbardziej złożonymi modelami zmian klimatu. Modele te charakteryzują się rozdzielczością przestrzenną siatki obliczeniowej sięgającą kilkuset kilometrów. Globalne modele klimatyczne dobrze odwzorowują poszczególne elementy klimatu na dużą skalę (globalną, kontynentalną), ale ich dokładność spada w miarę zmniejszania skali do regionalnej czy lokalnej, zwłaszcza w przypadku opadów atmosferycznych i temperatury powietrza, na których zmianę poważnie wpływa topografia i wykorzystanie (pokrycie) terenu. W związku z tym, w ciągu ostatnich kilku lat do badania zmian klimatu coraz powszechniej wykorzystywane są regionalne modele klimatyczne (RCM – *Regional Climate Model*), charakteryzujące się rozdzielczością przestrzenną rzędu 10 – 60 km.

W ostatnich latach wielu badaczy zajęło się prognozowaniem wpływu zmian klimatu w skali globalnej na jakość powietrza. Większość z tych prac dotyczyła prognoz poziomu ozonu troposferycznego [6,7]. Znacznie mniej prac dotyczy skali regionalnej i lokalnej [8-10]. Prace te odnoszą się do prognoz wartości średnich stężeń zanieczyszczeń.

Celem naszej pracy jest zastosowanie zaawansowanego systemu modelowania do analizy wpływu prognozowanych zmian klimatycznych, w horyzoncie czasowym do roku 2100, na krótko i długookresowe stężenia SO_2 oraz na depozycje związków tzw. siarki utlenionej (SO_x) dla obszaru Europy środkowo-wschodniej. Pierwotne i wtórne związki siarki obecne w atmosferze mają kompleksowy wpływ na zdrowie ludzkie i ekosystemy, a także na bilans radiacyjny atmosfery.

2. Metodyka

2.1. Opis systemu modelowania

Do oceny stanu zanieczyszczenia atmosfery w obecnym i przyszłym klimacie zastosowano system modelowania zbudowany z regionalnego modelu klimatycznego RegCM3, oryginalnego modelu emisji EMIL oraz modelu CAMx. System został

zaimplementowany dla siatki obliczeniowej o bardzo dużej rozdzielczości przestrzennej (10 km x 10 km), obejmującej Europę środkowo-wschodnią, ze środkiem zlokalizowanym nad obszarem Polski (52.00 °N, 19.30 °E). Rozmiar domeny (domena obliczeniowa PW, rys. 1), skonstruowanej w odwzorowaniu Lamberta (*Lambert Conformal Conic*), wynosi 120 x 109 węzłów, odpowiednio w kierunku x i y. Prace związane z budową i implementacją systemu zostały zapoczątkowane w ramach projektu 6. Programu Ramowego Unii Europejskiej CECILIA (*Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment*).

Trójwymiarowy Eulerowski model AQM trzeciej generacji CAMx został opracowany w ENVIRON International Corporation, Novato, California, USA [11]. Przestrzeń pionowa obszaru modelowania podzielona jest na 12 warstw o zmiennej wysokości, z górną warstwą na powierzchni 450 hPa. Do symulacji przemian chemicznych, z uwzględnieniem związków nieorganicznych, organicznych i aerozoli, wykorzystano mechanizm chemiczny Carbon Bond, wersja 4 (CB4) [12]. Mechanizm ten zawiera 117 reakcji (11 z nich to reakcje fotolizy) i uwzględnia do 67 związków (37 gazów, do 18 cząstek i 12 rodników). Symulacje jakości powietrza przeprowadzono z wykorzystaniem wersji modelu 4.40. Warunki brzegowe dla przeprowadzonych symulacji jakości powietrza pochodziły z obliczeń modelem CAMx, przeprowadzonych w domenie europejskiej w rozdzielczości przestrzennej 50 km x 50 km w Uniwersytecie Nauk o Ziemi (BOKU – *Universität für Bodenkultur*) w Wiedniu w ramach projektu CECILIA.

Regionalny model klimatyczny RegCM3 (*Regional Climate Model*) jest trójwymiarowym modelem hydrostatycznym, umożliwiającym symulacje klimatu nad zadanym obszarem. Model został opracowany w Międzynarodowym Centrum Fizyki Teoretycznej (ICTP – *The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics*) w Trieście. Fizyka modelu RegCM3 oparta jest na hydrostatycznej wersji modelu mezoskalowego MM5 [1]. Do symulacji wysokorozdzielczych (o kroku siatki modelowania rzędu 10 km), opracowana została wersja modelu o nazwie RegCM3-Beta [13], która jest składową opisywanego systemu modelowania. Przestrzeń pionowa obszaru modelowania podzielona została na 18 warstw o zmiennej wysokości, z górną warstwą na powierzchni 50 hPa.

Nie wszystkie pola meteorologiczne otrzymywane z modelu RegCM3-Beta mogą stanowić bezpośrednio zasilenie modelu CAMx. W związku z tym opracowano preprocesor, przygotowujący wymagane dane wejściowe do modelu CAMx (Uniwersytet Karola w Pradze, w ramach projektu CECILIA). W preprocesorze obliczane są także w sposób *on-line* emisje biogenne węglowodorów (izopren, mono-terpeny). Emisje te są obliczane jako funkcja parametrów meteorologicznych (temperatura i promieniowanie) oraz dostępnych kategorii użytkowania terenu, zgodnie z metodyką zaproponowaną przez Guenther i in. [14].

Ważną częścią pracy było przygotowanie bazy danych emisyjnych dla Polski. W tym celu opracowany został oryginalny model emisji EMIL (*EMission modeL*). Dla źródeł punktowych o wysokości komin powyżej 100 m przeprowadzono szczegółową inwentaryzację emisji dla roku 2000, obejmującą charakterystykę krajowych źródeł emisji: lokalizację emitorów, zmienność emisji w przekroju roku oraz parametry emisji, takie jak emisja ciepła, wysokość i średnica komin, prędkość wylotu spalin oraz emisja SO₂, NO₂ i PM₁₀. Źródła te w symulacjach jakości powietrza były modelowane jak źródła punktowe.

Dla źródeł powierzchniowych, liniowych i punktowych o wysokości komin poniżej 100 m, model generuje emisję dla każdego oczka siatki obliczeniowej, z uwzględnieniem szczegółowej inwentaryzacji źródeł emisji, przeprowadzonej dla roku 2000, w rozdzielczości przestrzennej 1 km × 1 km, danych meteorologicznych, właściwości terenu, a także danych dotyczących gęstości zaludnienia, aktywności poszczególnych sektorów, zapotrzebowania na

paliwa i ich właściwości. W modelu EMIL zastosowano krajowe wskaźniki zmienności czasowej emisji (miesięczne, dzienne i godzinowe) dla poszczególnych sektorów gospodarki.

Baza emisji antropogenicznej dla obszarów domeny leżących poza Polską, zostały przygotowane w BOKU w oparciu o dane EMEP, a dla krajów Kotliny Panońskiej dodatkowo w oparciu o wysokorozdzielcze inwentaryzacje w tych krajach. Wszystkie źródła emisji zawarte w tej bazie symulowane były w modelu CAMx jako źródła powierzchniowe.

W celu weryfikacji przyjętego systemu modelowania przeprowadzono symulacje dla roku 2000. Regionalny model klimatyczny zasilany był danymi europejskiego systemu reanalizy danych meteorologicznych ERA40 [15]. Następnie przeprowadzono symulacje dla trzech dekad: 1991-2000 (dekada kontrolna), 2041-2050 (DEK2) oraz 2091-2100 (DEK3). W tym przypadku RegCM3-Beta zasilany był wynikami z globalnego modelu klimatycznego ECHAM5 (Instytut Meteorologii Maxa Plancka, Hamburg), z wykorzystaniem scenariusza emisji gazów cieplarnianych SRES A1B IPCC [16]. Symulacje globalnym modelem klimatycznym w rozdzielczości 25 km, stanowiące warunki brzegowe dla regionalnych obliczeń klimatycznych, zostały przeprowadzone w ICTP w ramach projektu CECILIA. W celu określenia wpływu klimatu na jakość powietrza emisja we wszystkich symulacjach pozostawała stała, na poziomie z roku 2000.

2.2. Wybrane ekosystemy leśne

W celu określenia wpływu zmian klimatycznych na wybrane ekosystemy leśne w Polsce z domeny obliczeniowej wydzielono 2 obszary o dużym stopniu zalesienia: obszar „Karkonosze”, obejmujący Karkonoski Park Narodowy i Park Narodowy Gór Stołowych oraz obszar „Kampinos”, obejmujący Kampinoski Park Narodowy. Wybrane obszary są odmienne zarówno w aspekcie położenia geograficznego i warunków klimatycznych, jak i w aspekcie odległości od najbliższej aglomeracji miejskiej. Na rys. 1 przedstawiono lokalizację wybranych obszarów.



Rys. 1. Domena obliczeniowa PW z obszarami wybranymi do oceny wpływu zmian klimatu na ekosystemy leśne

2.3. Normy jakości powietrza

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 3 marca 2008 roku w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz. U. Nr 47, poz. 281) ustanawia dwa poziomy dopuszczalne dla SO₂ ze względu na ochronę zdrowia ludzkiego: 125 µg/m³ dla 24-godzinnego stężenia SO₂ oraz 350 µg/m³ dla 1-godzinnego stężenia SO₂, jednocześnie wartości te nie powinny być przekraczane odpowiednio więcej niż 3 i 24 razy w roku kalendarzowym. Poziom dopuszczalny dla SO₂ ze względu na ochronę roślin dla roku kalendarzowego i pory zimowej (okres od 01.10 do 31.03) wynosi 20 µg/m³.

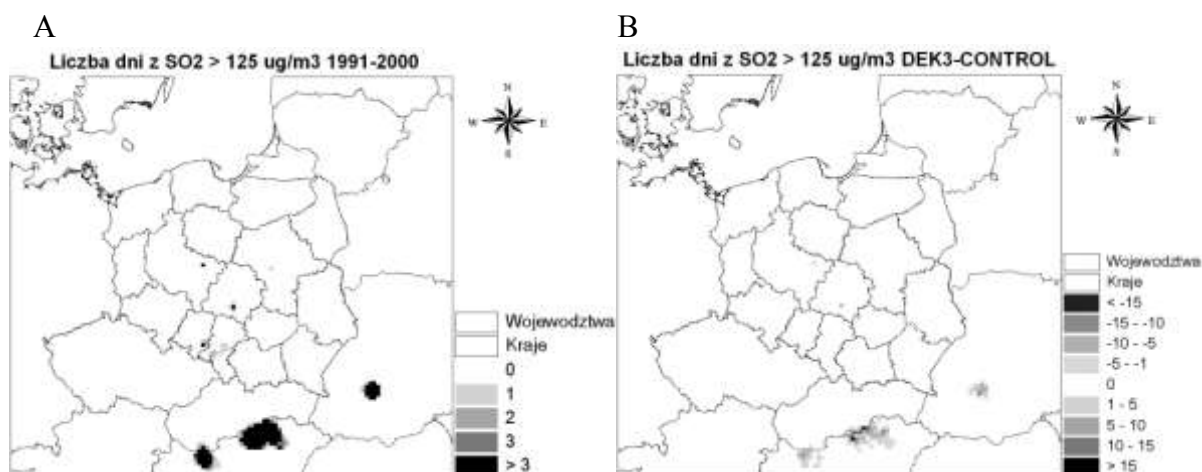
3. Wyniki

3.1. Weryfikacja systemu modelowania

Weryfikację systemu modelowania przeprowadzono dla roku 2000, przy zasilaniu modelu klimatycznego danymi z bazy ERA40. Wykorzystano wyniki pomiarów średnich rocznych stężeń SO₂ z 93 stacji pomiarowych, zlokalizowanych w domenie obliczeniowej PW, w tym z 5 stacji z obszaru Polski. Źródłem danych były bazy EMEP oraz EIONET-Airbase. Uzyskano zadowalającą ocenę działania systemu modelowania. Obliczone wskaźniki oceny modelu wynosiły: współczynnik korelacji serii pomiarowej z serią wyników modelowania $r = 0,67$; wskaźnik zgodności Willmotta IA = 0,76; błąd standardowy RMSE = 2,71 µg/m³; znormalizowany średni błąd kwadratowy NMSE = 0,45. Określono także liczbę par (pomiar-model), które znajdują się w obszarze zgodności „faktora 2”. Jest to powszechnie akceptowalna zgodność wyników modelowania z pomiarami. Zgodność taką otrzymano dla 75% stacji pomiarowych.

3.2. Wpływ zmian klimatu na przekroczenia poziomu dopuszczalnego SO₂ ustalonego ze względu na ochronę zdrowia

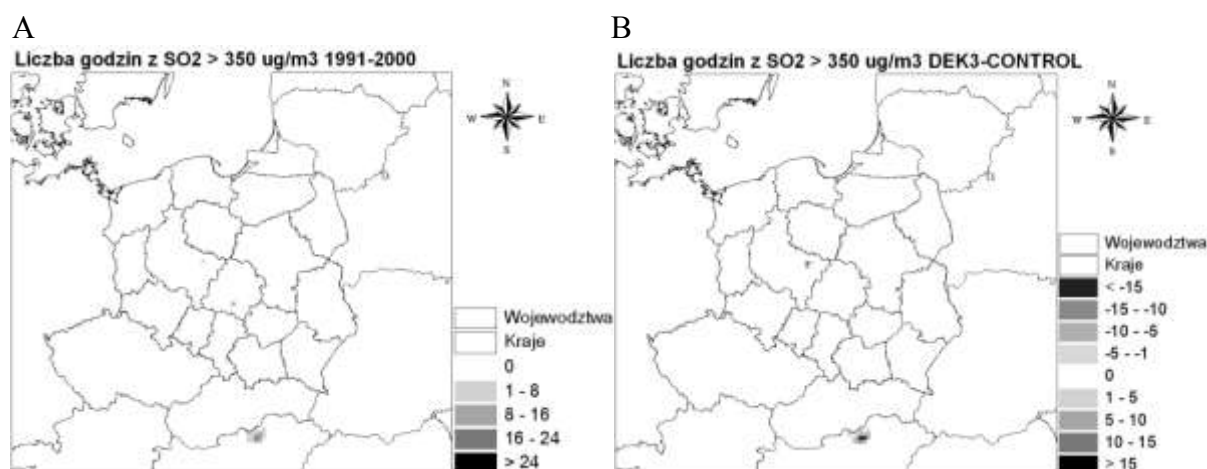
Rys. 2A przedstawia uśrednioną dla dekady kontrolnej (1991-2000) liczbę dni w ciągu roku ze średnimi dobowymi stężeniami SO₂ powyżej 125 µg/m³. Na Rys. 2B pokazano różnicę tego parametru pomiędzy DEK3 (2091-2100) a dekadą kontrolną.



Rys. 2. Liczba dni w ciągu roku z przekroczeniami dobowej wartości dopuszczalnej SO₂, uśredniona dla okresu 1991-2000 (A) oraz różnica pomiędzy liczbą dni z przekroczeniami, uśrednioną dla DEK3 (2091-2100) a uśrednioną dla dekady kontrolnej (B)

W dekadzie kontrolnej, na większości obszaru domeny PW nie stwierdzono dobowych stężeń SO_2 przekraczających wartość $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Przekroczenia wartości dopuszczalnej występują jedynie w okolicach dużych punktowych źródeł emisji (LCP). Maksymalna liczba dni w ciągu roku z przekroczeniami wartości dopuszczalnej wynosi 95 i występuje na obszarze północnych Węgier. W okresie 2091-2100 zanotowano w okolicach LCP zlokalizowanych w Polsce nieznaczny spadek liczby dni z przekroczeniami. W bezpośrednim otoczeniu LCP na Węgrzech i Ukrainie zanotowano spadek liczby dni z wartością powyżej $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oraz wzrost przekroczeń w dalszej odległości od tych źródeł. Największe różnice zostały obliczone w otoczeniu elektrowni Mátra na Węgrzech (od -18 na +17 dni).

Rys. 3A przedstawia uśrednioną dla dekady kontrolnej (1991-2000) liczbę godzin w ciągu roku ze średnimi dobowymi stężeniami SO_2 powyżej $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Rys. 3B prezentuje różnicę tego parametru pomiędzy DEK3 (2091-2100) a dekadą kontrolną.

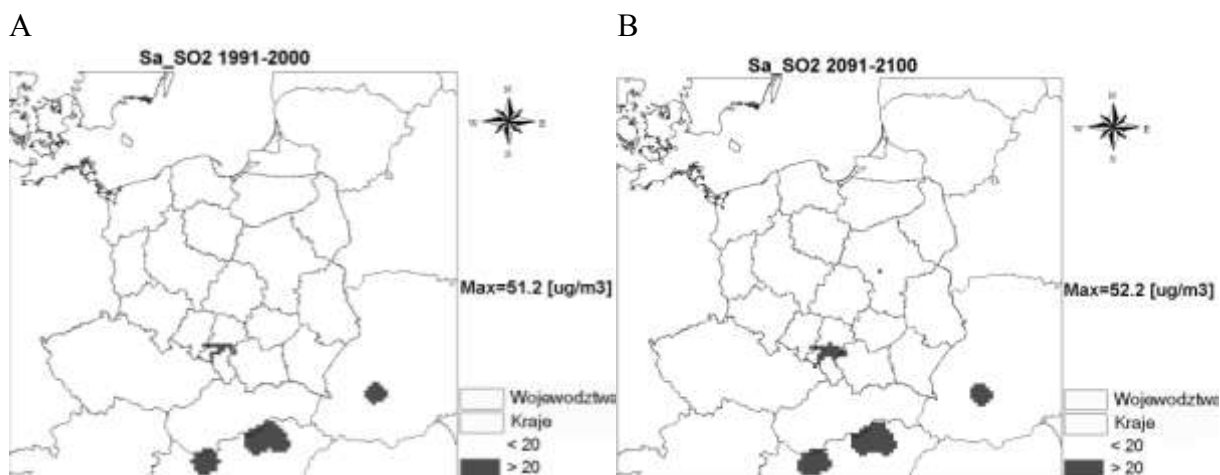


Rys. 3. Liczba godzin w ciągu roku z przekroczeniami 1-godzinnej wartości dopuszczalnej SO_2 , uśredniona dla okresu 1991-2000 (A) oraz różnica pomiędzy liczbą godzin z przekroczeniami uśrednioną dla DEK3 (2091-2100) a uśrednioną dla dekady kontrolnej (B)

W okresie 1991-2000, podobnie jak w przypadku stężeń dobowych, na większości obszaru domeny PW nie stwierdzono 1-godzinnych stężeń SO_2 przekraczających wartość $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Przekroczenia poziomu dopuszczalnego występują jedynie w okolicach LCP na Węgrzech i w Polsce, jednak liczba godzin ze stężeniem $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nie przekracza dozwolonych 24 godzin w roku kalendarzowym. Różnice między DEK3 a dekadą kontrolną występują jedynie w dwóch oczkach siatki – wzrost (do 14 godzin) w Polsce oraz spadek w pobliżu elektrowni Mátra na Węgrzech.

3.3. Wpływ zmian klimatu na przekroczenia poziomu dopuszczalnego SO_2 ustalonego ze względu na ochronę roślin

Rys. 4A i Rys. 4B przedstawiają przekroczenia poziomu dopuszczalnego SO_2 ze względu na ochronę roślin, wynoszącego $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, obliczone odpowiednio dla dekady kontrolnej (1991-2000) i DEK3 (2091-2100).



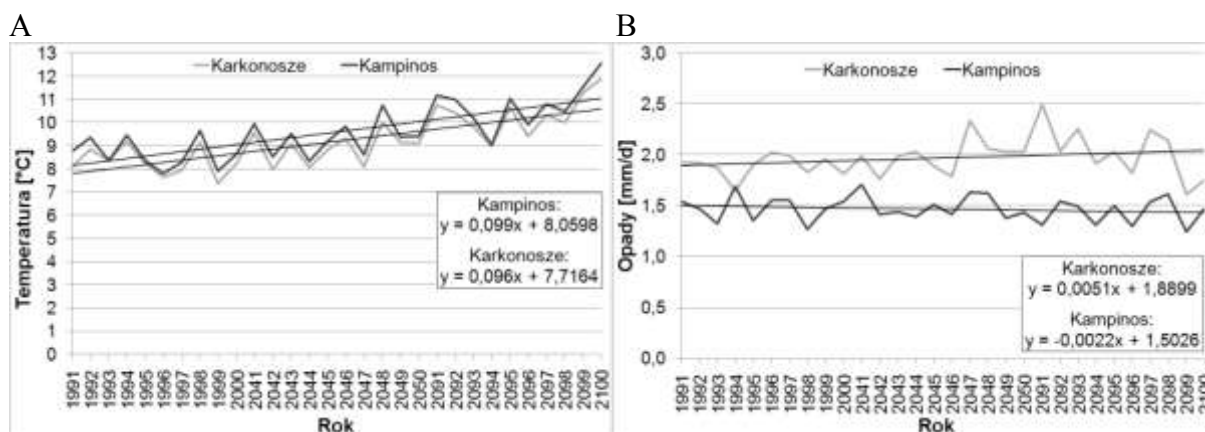
Rys. 4. Przekroczenia poziomu dopuszczalnego SO₂ ustanowionego ze względu na ochronę roślin, uśrednione dla okresu 1991-2000 (A) oraz 2091-2100 (B)

W dziesięcioleciu 1991-2000 przekroczenie rocznego poziomu dopuszczalnego ze względu na ochronę roślin stwierdzono tylko na obszarze Górnego Śląska oraz w sąsiedztwie LCP w północnych Węgrzech i na Ukrainie (wartość maksymalna wynosi 51 µg/m³). Pod koniec XXI wieku nie stwierdzono istotnej zmiany obszarów i rozmiarów przekroczeń wraz ze zmieniającym się klimatem. Jedynie na obszarze Górnego Śląska oszacowano nieznacznie większy obszar przekroczenia poziomu dopuszczalnego.

3.4. Wpływ zmian klimatu na depozycje SO_x w wybranych obszarach leśnych

Depozycję związków siarki utlenionej (SO_x), czyli sumy SO₂ i jonów siarczanowych SO₄²⁻, (SO_x = SO₂ + SO₄²⁻), obliczono przedstawionym systemem modelowania RegCM3-Beta/EMIL/CAMx dla każdego oczka siatki obliczeniowej wybranych obszarów leśnych. Obliczana była depozycja całkowita, jako suma depozycji suchej i mokrej. Odpowiednie procedury obliczeniowe umożliwiające uzyskanie zmiennej w czasie i przestrzeni depozycji suchej i mokrej, zawarte są w modelu CAMx [11]. Następnie uśredniono otrzymane wartości dla każdego z obszarów i poszczególnych lat. Na podstawie otrzymanych wartości wykonano analizę trendów zmian depozycji SO_x w analizowanym okresie lat 1991-2100. Dla okresów pomiędzy analizowanymi dziesięcioleciami założono liniową ciągłość parametrów.

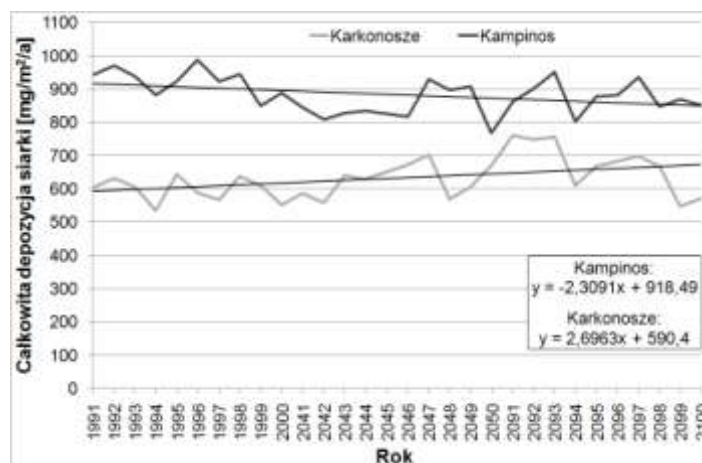
W taki sam sposób przeanalizowano trendy wybranych parametrów meteorologicznych obliczonych modelem RegCM3-Beta. Analizie poddano wartości temperatury (na wysokości 2 m) oraz opadu. Prognozowanie opadu atmosferycznego jest najtrudniejszym zadaniem stawianym modelom klimatycznym. Wszystkie istniejące modele klimatyczne znacznie przeszacowują opad, w związku z tym nie można wykorzystywać bezpośrednio wyników tych modeli. Stosuje się tutaj metody korygowania wyników obliczeń przy pomocy obserwacji. Przedstawione poniżej wartości opadu zostały skorygowane wartościami obserwacji z bazy danych Climate Research Unit CRU TS 1.2 [17]. Rys. 5 przedstawia oszacowaną zmienność temperatury i opadów w rozważanym okresie dla obu rozpatrywanych obszarach.



Rys. 5. Prognozowany trend zmian temperatury (A) i opadu (B) dla obszarów „Kampinos” i „Karkonosze” pomiędzy 1991 a 2100 r.

W rozpatrywanym okresie 1991-2100 wyraźnie widoczny jest wzrost temperatury w obu obszarach. Wynosi on $2,8^{\circ}\text{C}$, zarówno dla obszaru „Kampinos”, jak i dla obszaru „Karkonosze”. W tym samym okresie wartość opadów atmosferycznych wzrasta o $0,3$ mm/dzień w obszarze „Karkonosze” i nieznacznie maleje, o $0,05$ mm/dzień w obszarze „Kampinos”.

Na rys. 6 pokazano oszacowaną zmienność całkowitej depozycji SO_x w rozważanym okresie dla obu rozpatrywanych obszarów.



Rys. 6. Prognozowany trend zmian w całkowitej depozycji SO_x [mg(S)/m²] dla obszarów „Kampinos” i „Karkonosze” pomiędzy 1991 a 2100 r.

W rozważanym okresie widoczny jest malejący trend depozycji siarki na obszarze „Kampinos” oraz rosnący trend na obszarze „Karkonosze”. Wzrost całkowitej depozycji siarki dla obszaru „Karkonosze” wynosi 80 mg(S)/(m² rok), natomiast spadek dla obszaru „Kampinos” wynosi 70 mg(S)/(m² rok).

4. Podsumowanie i wnioski

W pracy przeprowadzono wysokorozdzielcze symulacje wpływu zmian klimatu na stężenia SO_2 i depozycje SO_x dla obszaru Europy środkowo-wschodniej. Zastosowano system modelowania RegCM3-Beta/EMIL/CAMx, który okazał się przydatnym narzędziem

badawczym. Uzyskane wyniki modelowania stężeń SO_2 dla roku 2000 z zadawalającą dokładnością odwzorowują wartości pomiarowe z 93 stacji monitoringu atmosfery. Porównanie wyników stężeń SO_2 uzyskanych w pobliżu źródeł LCP dla obszaru Polski oraz dla obszaru Ukrainy i Węgier wskazuje na lepsze działanie modelu dla obszaru Polski. Istotne okazało się wykorzystanie parametrów źródeł LCP do symulacji wyniesienia i rozprzestrzeniania się smugi w skali podsiatkowej. Dla obszarów Ukrainy i Węgier parametry źródeł LCP były symulowane jak źródła powierzchniowe, co spowodowało wyraźne zawyżanie stężeń w pobliżu tych źródeł.

Wyniki symulacji wskazują na niewielki wpływ prognozowanych zmian klimatu na stężenia SO_2 . Pomiędzy dekadą kontrolną a dekadą 2091-2100 nastąpił niewielki ($2,5\text{-}3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) wzrost średnich stężeń SO_2 nad Europą środkowo-wschodnią. Również przekroczenia dobowych i 1-godzinnych poziomów dopuszczalnych mają bardzo zbliżone wartości i rozkład przestrzenny. Największe zmiany widoczne są w pobliżu źródeł LCP. W przeprowadzonych symulacjach wartość emisji była zawsze stała, a jakość powietrza uzależniona była tylko od prognozowanych zmian parametrów klimatu. Wyniki wskazują, że stężenia SO_2 , jako zanieczyszczenia pierwotnego, w niewielkim stopniu podlega tym zmianom.

Wpływ zmian klimatu jest natomiast wyraźniej widoczny w przypadku otrzymanych trendów depozycji SO_x . Analiza tych trendów wskazuje na spadek depozycji siarki, o $70 \text{ mg(S)}/(\text{m}^2 \text{ rok})$ w obszarze „Kampinos” oraz wzrost o $80 \text{ mg(S)}/(\text{m}^2 \text{ rok})$, w obszarze „Karkonosze”. Równocześnie dla obu obszarów model wskazuje na wzrost temperatury, a w przypadku opadu prognozowany jest jego wzrost dla obszaru „Karkonosze”, natomiast dla obszaru „Kampinos” linia trendu nie wykazuje praktycznie zmian. Wzrost depozycji w obszarze „Karkonosze” wynika prawdopodobnie zarówno ze wzrostu depozycji mokrej (wzrost opadów), jak i ze wzrostu depozycji suchej. Wyniki modelu klimatycznego (nie przedstawione w obecnej pracy) wskazują na wzrost prędkości wiatru w przyszłym klimacie dla obu obszarów. Dla obszaru „Karkonosze” jest to prawdopodobnie przyczyną, charakterystycznego dla obszarów górskich i podgórszych, wzrostu depozycji suchej. Natomiast spadek depozycji w obszarze „Kampinos” jest prawdopodobnie związany z usytuowaniem obszaru w pobliżu aglomeracji warszawskiej i dużych źródeł punktowych emisji SO_2 . Smuga zanieczyszczeń z tych źródeł, przy większych prędkościach wiatru, jest szybciej transportowana na dalsze odległości, czego skutkiem jest zmniejszenie depozycji suchej w analizowanym obszarze.

Przedstawione w pracy badania będą kontynuowane. Analizie poddany zostanie rozkład stężeń i depozycji związków azotu, a następnie ładunków krytycznych siarki i azotu pokarmowego dla wybranych obszarów, a także przekroczeń tych ładunków krytycznych.

Podziękowania

Obliczenia częściowo wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.

Praca została zrealizowana w ramach projektu 6. Programu Ramowego Unii Europejskiej o akronimie CECILIA (Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment).

Literatura

1. Grell G.A., Dudhia J., Stauer D.R.: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), Technical report NCAR/TN-398+STR. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado 1994
2. Houyoux M.R., Vukovich J.M., Coats Jr. C.J., Wheeler N.J.M., Kasibhatla P.: Emission inventory development and processing for the seasonal model for regional Air Quality. *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105 (D7), 9079–9090
3. Tesche T.W., Morris R., Tonnesen G., McNally D., Boylan J., Brewer P.: CMAQ/CAMx annual 2002 performance evaluation over the eastern US. *Atmos. Environ.*, 2006, vol. 40, 4906-4919
4. Cuvelier C., Thunis P., Vautard R., Amann M., i in.: CityDelta: A model intercomparison study to explore the impact of emission reductions in European cities in 2010. *Atmos. Environ.*, 2007, vol. 41, 189-207
5. EEA: Ensuring quality of life in Europe's cities and towns. Tackling the environmental challenges driven by European and global change, EEA Report No 5/2009, Kopenhaga 2009
6. Stevenson D. S., Dentener F.J., Schultz M.G., Ellingsen K., i in.: Multimodel ensemble simulations of present-day and near-future tropospheric ozone. *J. Geophys. Res.*, 2006, Vol. 111, D08301, doi:10.1029/2005JD006338
7. Racherla P.N., Adams P.J.: The response of surface ozone to climate change over the Eastern United States. *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, vol. 8, 871-885
8. Szopa S., Hauglustaine D.A., Vautard R., Menut L.: Future global tropospheric ozone changes and impact on European air quality. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, L18805, doi: 10.1029/2006GL25860
9. Meleux F., Solmon F., Giorgi F.: Increase in summer European ozone amounts due to climate change. *Atmos. Environ.*, 2007, vol. 41, 7577-7587
10. Nolte C.G., Gilliland A.B., Hogrefe C., Mickley L.J.: Linking global to regional models to assess future climate impacts on surface ozone levels in the United States. *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, D14307, doi:10.1029/2007JD008497
11. ENVIRON: User's Guide to the Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx), Version 4.40. ENVIRON International Corporation, Novato, California 2006
12. Gery M.W., Whitten G.Z., Killus J.P., Dodge M.C.: A Photochemical Kinetics Mechanism for Urban and Regional Scale Computer Modelling. *J. Geophys. Res.*, 1989, vol. 94, 12925–12956
13. Pal J.S., Giorgi F., Bi X., Elguindi N., i in.: Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2007, vol. 88, 1395–1409
14. Guenther A.B., Zimmermann P.C., Harley R., Monson R.K., Fall R.: Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluations and sensitivity analyses. *J. Geophys. Res.*, 1993, vol. 98, 12609–12617
15. Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., i in.: The ERA-40 re-analysis. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2005, vol. 131, 2961-3012
16. Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., i in.: Special Report on Emission Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge 2000
17. New M, Lister D., Hulme M., Makin I.: A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Clim. Res.* 2000, vol. 21, 1–25.