

# ZMIANY KLIMATU A MONITORING I PROGNOZOWANIE STANU ŚRODOWISKA ATMOSFERYCZNEGO



Pod redakcją  
MICHAŁA ZIEMIAŃSKIEGO  
LESZKA OŚRÓDKI

SERIA PUBLIKACJI NAUKOWO-BADAWCZYCH IMGW-PIB  
2012



# ZMIANY KLIMATU A MONITORING I PROGNOZOWANIE STANU ŚRODOWISKA ATMOSFERYCZNEGO

Pod redakcją  
MICHAŁA ZIEMIAŃSKIEGO I LESZKA OŚRÓDKI

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej  
Państwowy Instytut Badawczy

Warszawa 2012



SERIA PUBLIKACJI NAUKOWO-BADAWCZYCH IMGW-PIB

## ZMIANY KLIMATU A MONITORING I PROGNOZOWANIE STANU ŚRODOWISKA ATMOSFERYCZNEGO

### **Recenzenci:**

dr hab. inż. Lech Łobocki (część I)

dr hab. Józef Stefan Pastuszka (część II)

Praca przedstawia rezultaty projektu Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo (zmiany, skutki i sposoby ich ograniczania, wnioski dla nauki, praktyki inżynierskiej i planowania gospodarczego) finansowanego ze środków Unii Europejskiej i budżetu państwa

### **Komitet Redakcyjny Wydawnictw IMGW-PIB**

prof. dr hab. inż. Janusz Zaleski – przewodniczący,

mgr Karolina Racka – sekretarz,

dr Rafał Bąkowski, dr inż. Ryszard Kosierb, prof. nadzw. dr hab. Halina Lorenc,

dr Danuta Limanówka, dr Elżbieta Łysiak-Pastuszek,

prof. dr hab. inż. Maciej Maciejewski, prof. dr hab. inż. Wojciech Majewski,

dr inż. Mieczysław S. Ostojski, prof. dr hab. inż. Laura Radczuk,

prof. dr hab. inż. Kazimierz Rózdżyński, mgr inż. Edmund Sieński, mgr Rafał Stepnowski,

dr inż. Wiwiana Szalińska, dr hab. Jan Szturc, dr inż. Tamara Tokarczyk,

dr inż. Tomasz Walczykiewicz, prof. nadzw. dr hab. inż. Jan Winter

**ISBN 978-83-61102-66-3**

### **Wydawca**

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy

01-673 Warszawa, ul. Podleśna 61, E. content@imgw.pl

**Projekt składa się z 9 zadań:**

**Zadanie 1:** Zmiany klimatu i ich wpływ na środowisko naturalne Polski oraz określenie ich skutków ekonomicznych

Koordynator zadania: dr hab. Mirosław Miętus, prof. nadzw. (01.12.2008 – 30.11.2011 r.), prof. dr hab. Joanna Wibig (01.01.2012 – 30.06.2012 r.)

**Zadanie 2:** Stan zanieczyszczeń powietrza w Polsce i jego wpływ na jakość życia – możliwości ograniczenia skutków

Koordynator zadania: dr Leszek Ośródk

**Zadanie 3:** Zrównoważone gospodarowanie wodą, zasobami geologicznymi i leśnymi kraju

Koordynator zadania: dr inż. Tomasz Walczykiewicz

**Zadanie 4:** Klęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne (cywilne i ekonomiczne) kraju

Koordynator zadania: dr hab. Halina Lorenc, prof. nadzw.

**Zadanie 5:** Rozwój metod prognozowania i systemów ostrzegania przed groźnymi zjawiskami hydrologicznymi i meteorologicznymi oraz wykorzystanie ich do osłony kraju

Koordynator zadania: dr Michał Ziemiański

**Zadanie 6:** Bałtyk jako element systemu klimatycznego i jego rola w tworzeniu się stanów zagrożenia

Koordynator zadania: dr hab. Mirosław Miętus, prof. nadzw. (01.12.2008 – 30.11.2011 r.), mgr inż. Ewa Jakusik (01.12.2011 – 30.06.2012 r.)

**Zadanie 7:** Zagrożenia i uwarunkowania oraz możliwości realizacji krajowego zaopatrzenia w wodę ludności w świetle przepisów Unii Europejskiej

Koordynator zadania: mgr inż. Lidia Gutowska Siwec

**Zadanie 8:** Przeciwdziałanie degradacji polskich zbiorników retencyjnych

Koordynator zadania: mgr inż. Edmund Sieński

**Zadanie 9:** Perspektywiczne zagospodarowanie dorzecza Wisły z systemem ocen wpływu inwestycji hydrotechnicznych na środowisko

Koordynator zadania: prof. dr hab. inż. Wojciech Majewski

Niniejszy tom zawiera wyniki uzyskane w zadaniach 2 i 5 Projektu KLIMAT.



## **OD AUTORA PROJEKTU**

*Maciej Maciejewski*

Głównym wykonawcą Projektu jest Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy. W Projekcie wzięli również udział specjaliści z: Instytutu Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Uniwersytetu Gdańskiego, Morskiego Instytutu Rybackiego w Gdyni, Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w m. st. Warszawie, Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych, Państwowego Instytutu Geologicznego, Szkoły Głównej Handlowej, Uniwersytetu im. A. Mickiewicza, Instytutu Upraw Nawożenia i Gleboznawstwa PIB, Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego, Instytutu Badawczego Leśnictwa.

Zrealizowany Projekt jest odzewem na wielokrotnie formułowane wnioski o potrzebie badań w zakresie spodziewanych zmian klimatu i ich skutków dla gospodarki kraju. Interdyscyplinarny projekt uwzględnia:

- obszerną wiedzę dotyczącą problematyki zmian klimatu,
- oddziaływanie tych zmian na gospodarkę, środowisko i społeczeństwo,
- propozycje rozwiązań ograniczających skutki zmian klimatu,
- propozycje działań adaptacyjnych do nowych warunków środowiskowych w ważnych dziedzinach życia gospodarczego i społecznego.

Z uwagi na przewidywane formy zagrożeń wynikających z ocieplenia klimatu, jako krótkoterminowe działania zostały opracowane propozycje bieżących ostrzeżeń oraz osłony gospodarki i społeczeństwa przed ekstremalnymi zjawiskami atmosferycznymi i hydrologicznymi.

Działania długofalowe znalazły wyraz w postaci klimatycznych modeli w skali regionalnej, scenariuszy oddziaływań klimatu na produkcję rolną i lasy, prognoz potrzeb wodnych oraz sposobów ochrony wód powierzchniowych i podziemnych, prognozy skutków ekonomicznych i społecznych w następstwie zmian klimatu i występowania zdarzeń ekstremalnych. Został również podjęty problem wypracowania systemu zaopatrzenia w wodę ludności w świetle przepisów UE (oraz wariantowych scenariuszy adaptacji do zmian klimatu).

Celem Projektu było określenie wpływu ocieplenia klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo oraz skutków i sposobów ich ograniczenia, a także wypracowanie działań adaptacyjnych do nowych warunków środowiskowych i ważnych dziedzin życia gospodarczego i społecznego.

Celem użytkowym części Projektu jest dostarczenie decydom informacji o scenariuszach zmian klimatu i narzędzi pozwalających symulować różne warianty decyzji gospodarczo-społecznych w aspekcie minimalizacji strat wywołanych ewentualnymi zmianami czy wahaniami klimatu.

Zaprezentowane w Projekcie scenariusze określają zakres zmienności klimatu, z jakim należy się liczyć w działaniach gospodarczych. Te dane szacunkowe, o określonym prawdopodobieństwie, dotyczące występowania ewentualnych zagrożeń ze strony klimatu oraz związanych z nimi skutków umożliwiają decydom podejmowanie decyzji – niestety w warunkach niepewności – oraz szacowanie stosunku koniecznych nakładów do przewidywanych strat.

Wstępne wyniki prac Projektu stanowiły podstawę do tworzenia nowych systemów osłony ludności i gospodarki na wypadek występowania groźnych zjawisk hydrologicznych i meteorologicznych oraz katastrof technologicznych. W następstwie przygotowano nowy projekt pn. *Informatyczny system osłony kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami (ISOK)*, który jest w trakcie realizacji.

Pełny materiał dokumentujący wykonanie każdego z 9 zadań w Projekcie jest zawarty w:

- sprawozdaniach miesięcznych, kwartalnych i rocznych obejmujących części poznawcze i aplikacyjne, modele, obliczenia, wyniki, wnioski, opracowania cząstkowe,
- czterech tomach opracowań końcowych:
  - I tom: *Warunki klimatyczne i oceanograficzne w Polsce i na Bałtyku Południowym – spodziewane zmiany i wytyczne do opracowania strategii adaptacyjnych w gospodarce krajowej* (zad. 1 i 6),
  - II tom: *Zmiany klimatu a prognozowanie i monitorowanie stanu środowiska atmosferycznego* (zad. 2 i 5),
  - III tom: *Klęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju* (zad. 4),
  - IV tom: *Zrównoważone gospodarowanie zasobami wodnymi oraz infrastrukturą hydrotechniczną w świetle prognozowanych zmian klimatycznych* (zad. 3, 7, 8, 9).

## **I. Postawienie problemu**

### **I.A. Wprowadzenie**

Klimat to całokształt czynników fizycznych atmosfery i warunków pogodowych charakterystycznych dla danego obszaru, kształtowanych pod wpływem położenia geograficznego i cech fizycznych tego obszaru oraz określonych na podstawie wieloletnich pomiarów i obserwacji. Oznacza to, że na klimat Ziemi mają wpływ następujące czynniki zewnętrzne i wewnętrzne:

- intensywność promieniowania Słońca,
- erupcja wulkanów,
- okołoziemskie prądy morskie i stałe wiatry (pasaty strefy równikowej),
- zmienność pokrywy lądowej w strefach okołobiegunowych,

- działalność człowieka.

Biorąc pod uwagę setki tysięcy lat aktywności Słońca i wulkanów, jako główną przyczynę ocieplenia się klimatu na Ziemi należy wskazać czynnik antropogeniczny, czyli rosnące stężenie gazów cieplarnianych.

Dane pochodzące z analizy izotopowej rdzeni lodowych również wskazują, że od 650 tysięcy lat nie było powietrza tak dużo CO<sub>2</sub> jak obecnie. W tym względzie przeważa pogląd, że wzrost stężenia atmosferycznych gazów cieplarnianych spowodowany działalnością człowieka jest obserwowany od początku ery industrialnej [Climat Change 2007: Synthesis Report, IPCC].

Z drugiej strony czynniki zewnętrzne i wewnętrzne mogą wykazywać charakter cykliczny, powodując ustalanie się nowego stanu równowagi atmosfery i hydrosfery. Przykładem może być ochłodzenie w XVII-XVIII w. znane jako mała epoka lodowcowa. Wówczas pojawiły się ostre zimy i chłodne lata; zaczęły się około 1650 r. i trwały do roku 1715, powodując wymarżnięcie upraw, głód i w konsekwencji liczne ofiary śmiertelne w Europie. Potem nastąpił proces globalnego ocieplania się klimatu.

Przyczyny współczesnego ocieplenia są tematem wielu badań. Wnioski z nich nie są jednoznaczne, a nauka dysponuje wieloma klimatycznymi modelami matematycznymi pozwalającymi odtwarzać zmiany temperatury globalnej w ostatnim stuleciu oraz prognozować je z wyprzedzeniem do 100 lat. Jednak poziom niepewności tych przewidywań jest tak wysoki, że możliwe są różne scenariusze.

Warto w tej sytuacji być przygotowanym na obydwa warianty, gdyż w przyrodzie jedyną rzeczą pewną jest niepewność.

## **I.B. Modele klimatyczne**

Czy matematyczne modele klimatyczne, na których podstawie są opracowane prognozy przyszłych zmian klimatu są wiarygodne?

Odpowiedź jest prosta.

Każdy model matematyczny opisujący procesy występujące w naturze, jeżeli nie zostanie potwierdzony eksperymentem pozostaje jedynie niepotwierdzoną teorią. Modele klimatycznych prognozujących zmiany klimatu trudno obecnie zliczyć. Z raportów ogłoszonych przez IPCC<sup>1</sup> wynika generalny wniosek: „ocieplenie klimatu jest spowodowane emisją antropogeniczną gazów cieplarnianych, a konsekwencje tego będą oddziaływać na działalność i życie człowieka w przyszłości”. Współczesne stanowisko IPCC nie wyklucza również dużego wpływu przyczyn naturalnych.

---

<sup>1</sup> IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change – organizacja założona w 1988 r. przez Światową Organizację Meteorologiczną (WMO) oraz Program Środowiskowy Organizacji Narodów Zjednoczonych (UNEP) celem oceny ryzyka związanego z wpływem człowieka na zmiany klimatyczne. IPCC opracowuje raporty dotyczące zmian klimatu, z których ostatni ukazał się w 2007 r. (tzw. AR4) a kolejny jest planowany na rok 2014.

## **I.C. Monitorowanie zmian**

Niepewność wyników przedstawianych przez naukę sprawia, że przebieg zmian w systemie klimatycznym musi być monitorowany.

System monitoringu powinien być kompleksowy, skuteczny i powszechny.

Kompleksowość tego systemu polega na tym, że musi on obejmować spójnie wszystkie istotne procesy fizyczne zachodzące w atmosferze i hydrosferze, które są powiązane różnymi związkami przyczynowo-skutkowymi, i z których każdy osobno lub kilka łącznie może wywierać niekorzystny wpływ na ludzi i gospodarkę. Kompleksowość systemu znajduje odzwierciedlenie w zintegrowanej meteorologicznej i hydrologicznej metodyce badawczej, zintegrowanym systemie pomiarowo-obszaryjnym, a także zintegrowanej technice i technologii przesyłania, przetwarzania i gromadzenia danych. Dane te muszą być zbierane ze wszystkich dostępnych źródeł z naziemnego systemu obserwacyjno-pomiarowego, systemu wymiany międzynarodowej, systemów satelitarnych i radarowych, systemów teledetekcyjnych, wyników modeli meteorologicznych i hydrologicznych, które się wzajemnie weryfikują.

Skuteczność systemu monitoringu zmian klimatu będziemy oceniać trafnością przewidywania czasu i miejsca występowania oraz natężenia zjawisk przyrody niesprzyjających lub groźnych, z takim wyprzedzeniem w stosunku do momentu ich występowania, aby możliwe było zorganizowanie działań zaradczych i dostosowawczych, eliminujących lub redukujących zagrożenie życia oraz mienia.

Powszechność zaś tego systemu będzie się wyrażać tym, w jakim stopniu będzie on zaspokajać potrzeby: indywidualne, zbiorowe, rządowe i samorządowe, pojawiające się w tym zakresie.

Do indywidualnych należy zaliczyć potrzeby wszystkich członków społeczeństwa, dostosowujących swoją aktywność osobistą i zawodową do zmiennych, prognozowanych warunków otoczenia na podstawie informacji hydrologiczno-meteorologicznej upowszechnianej przez środki masowego przekazu.

Spośród zbiorowych odbiorców na pierwszym miejscu należy wymienić takie działy gospodarki narodowej wymagającej osłony specjalistycznej, jak: obrona narodowa, gospodarka morską, rolnictwo, transport lądowy i morski, ochrona środowiska, a także sektor ubezpieczeń. Ponadto do grupy tej należy zaliczyć również takie dziedziny jak: gospodarkę wodną z osłoną przeciwpowodziową i problematyką suszy, energetykę, sadownictwo i rekreację. Najwyższy poziom w sektorze odbiorców informacji prognostycznej, monitoringowej zajmują organy władzy państwowej i samorządowej, które są odpowiedzialne za przygotowanie państwa do działań w sytuacjach niebezpiecznych i organizowania ochrony społeczeństwa przed skutkami nadzwyczajnych zagrożeń. (Warto wspomnieć, że w trakcie realizacji Projektu w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytucie Badawczym utworzono Centrum Monitoringu Klimatu Polski).

## **I.D. Zmiany klimatyczne i wrażliwość klimatu**

Ewolucja definicji „zmiany klimatyczne” świadczy o delikatności materii, a mianowicie:

- Przyjęta przez Konwencję Klimatyczną (Ramowa Konwencja Klimatyczna Narodów Zjednoczonych w sprawie Zmian Klimatu – United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC) w roku 1992 definicja mówi, że „zmiana klimatyczna wynika wyłącznie – pośrednio lub bezpośrednio – z działalności ludzkiej, która zmienia skład atmosfery globalnej i która uzupełnia lub dopełnia naturalną zmienność klimatyczną obserwowaną w porównywalnych okresach”.
- Definicja w Raporcie IPCC z 2007 r. mówi o zmianie stanu klimatu „która może zostać zidentyfikowana (np. za pomocą testów statystycznych) jako zmiana średnich charakterystyk i/lub ich zmienności, która utrzymuje się przez długi czas, zazwyczaj dekadę lub dłużej”.

Ta pozornie niewielka zmiana w zapisie, dotycząca w istocie swej globalnego ocieplenia klimatu, ma swoich zwolenników i przeciwników zarówno w kręgach naukowych, jak i politycznych. Decydujące znaczenie w tym „sporze” ma rzecz jasna kwestia czy wzrost poziomu CO<sub>2</sub> (odpowiedzialny głównie za efekt cieplarniany) w atmosferze jest odpowiedzialny za zmiany klimatu. Coraz więcej zwolenników, w tym naukowców klimatologów, przestaje uznawać człowieka za jedyne winnego ocieplenia klimatu (grupa przeciwna IPCC). Polityczne lobby energetyczne także popiera to stanowisko. Dla tej grupy, działania zmierzające do ograniczenia wykorzystania surowców energetycznych i zastąpienia ich innymi źródłami energii oznaczają utratę zysków i przywilejów. Problem jest niezmiernie ważny i wrażliwy.

Przez wrażliwość klimatu będziemy rozumieć jego „odpowiedzi” w postaci zmian temperatury, będących skutkiem zwiększania się ilości CO<sub>2</sub> oraz innych gazów cieplarnianych, oddziaływania plam słonecznych, tworzenia się dziury ozonowej, zmian parowania wód oceanicznych

## **I.E. Scenariusze emisji i scenariusze klimatu Polski na lata 2011-2030<sup>2</sup>**

Opisane w raporcie IPCC scenariusze emisji gazów cieplarnianych SRES (Special Report on Emission Scenarios) otrzymały akronimy A1, A2, B1 i B2. Opisują one różne zmiany podstawowych czynników wpływających zarówno na globalny rozwój, jak i na emisję gazów cieplarnianych, m.in. wzrost liczby ludności, rozwój technologiczny i ekonomiczny, zużycie energii.

Scenariusz A1 zakłada gwałtowny wzrost gospodarczy oraz osiągnięcie wysokiego wzrostu populacji w XXI wieku. W tym scenariuszu, w grupie A1F1,

---

<sup>2</sup> Dokładne wyniki badań przedstawiono w tomie I pt. „Warunki klimatyczne i oceanograficzne w Polsce i na Bałtyku Południowym – spodziewane zmiany i wytyczne do opracowania strategii adaptacyjnych w gospodarce krajowej” (obejmuje zad 1 i 6).

zakłada się intensywne wykorzystanie paliw kopalnych, w grupie A1T – użycie innych źródeł energii niż paliwa kopalne, w grupie A1B – równowagę w wykorzystaniu tych paliw.

Scenariusz A2 zakłada wysoki wzrost populacji, wolny wzrost ekonomiczny oraz powolne zmiany technologiczne.

Scenariusz B1 zakłada wysoką dynamikę wzrostu populacji, tak jak i A1, przy czym zmiany technologiczne i ekonomiczne następują szybciej.

Scenariusz B2 to średni wzrost populacji i średni wzrost ekonomiczny z naciskiem na lokalne rozwiązania, zakładające zrównoważony rozwój w aspekcie ekonomicznym, społecznym i środowiskowym.

W projekcie KLIMAT opracowano dwa typy scenariuszy klimatycznych na lata 2011-2030:

- statystyczno-empiryczne scenariusze dla wybranych elementów meteorologicznych (temperatura powietrza, opady atmosferyczne, zachmurzenie, wilgotność powietrza) na podstawie symulacji modelu ECHAM-5 i statystyczno-empirycznego downscalingu<sup>3</sup>.
- dynamiczne scenariusze, w których symulacje klimatyczne przeprowadzono za pomocą modelu Reg CM31, z warunkami brzegowymi i początkowymi z eksperymentu EH5-T63L31-OM-GR15L40 wykonanego w ramach obliczeń dla potrzeb czwartego raportu IPCC AR4 w Instytucie Maxa Plancka w Hamburgu. Symulacje referencji (REF) dla okresu 1971-1990 oparto na eksperymencie 20 C3M, natomiast projekcje dla okresów 2011-2030 wykonano dla scenariuszy SRES A2, A1B i B1.

Projekcje zmian temperatury, otrzymane drogą dynamicznego downscalingu dla trzech scenariuszy emisji A2, A1B i B1, są zbliżone do otrzymanych metodami statystycznymi. Jednakże ich jakość budzi wątpliwości, gdy porównamy je z obecnymi trendami temperatury. Przedstawione projekcje dotyczą różnic między okresem scenariuszowym 2011-2030, a referencyjnym 1971-1990. W przypadku niektórych sezonów, szczególnie wiosny i zimy, obserwowany w okresie 1971-2010 kierunek zmian temperatury jest przeciwny do tego, na jaki wskazują projekcje.

Ta sytuacja spowodowała, że w Projekcie scenariusze postanowiono opracować na podstawie dużej liczby dostępnych symulacji, z wykorzystaniem różnych regionalnych modeli klimatu. Skoncentrowano wiązkę 14 symulacji: trzech wykonanych w IMGW-PIB z wykorzystaniem modelu RegCM oraz jedenastu wykonanych w ramach projektu ENSEMBLE. Ponieważ do roku 2030 wymuszenia związane z antropogenicznymi emisjami dwutlenku węgla do atmosfery w scenariuszach A2, A1B i B1 różnią się minimalnie, a wpływ tych różnic na symulowany klimat jest znacznie mniejszy od różnic związanych z wyborem modelu globalnego, regionalnego czy warunków początkowych, skoncentrowano jedną projekcję klimatu. Różnice między modelami pozwoliły na ocenę zakresu przewidywanych zmian i ich statystycznej istotności.

---

<sup>3</sup> Przechodzenie do coraz mniejszej skali.

Scenariusze wiążkowe wskazują na kontynuację ocieplenia w ciągu najbliższych 20 lat. Ta zmiana jest zgodna z trendem obserwowanym w Polsce od połowy XX wieku. We wszystkich porach roku, oprócz wiosny, wzrost temperatury między okresami 1971-1991 a 2011-2030 wyniesie od 0,5 do 0,7°C.

Wiosną prognozowane ocieplenie będzie mniejsze i wyniesie 0,2-0,4°C. Wraz z temperaturą średnią rosła temperatura minimalna i maksymalna, przy czym wzrost temperatury maksymalnej jest nieznacznie mniejszy od średniej, a minimalnej nieco większy. Ocieplenie spowoduje wzrost częstości pojawiania się dni gorących i upalnych oraz spadek liczby dni przymrozkowych i mroźnych. Te zmiany są spójne na obszarze całego kraju i zgodne z kierunkiem zmian obserwowanym od połowy XX wieku.

Prognozowane zmiany opadów nie są już ani tak wyraźne, ani jednorodne w czasie i przestrzeni. Przewiduje się, że roczne sumy opadów dla okresu 2011-2030 w stosunku do okresu referencyjnego 1971-1990 minimalnie wzrosną. Wzrost o 1-4% nie jest istotny statystycznie i rozrzut między prognozami różnych modeli w wiążce nie gwarantuje, że te prognozy się sprawdzą. W skali sezonów nieznaczny wzrost sum opadów, sięgający kilku procent, jest prognozowany od jesieni do wiosny, natomiast latem bardziej prawdopodobny jest spadek sum opadu do 2%. Duży rozrzut prognoz między uwzględnionymi modelami powoduje jednak, że ich statystyczna istotność jest niska. Jest to zgodne ze zmianami obserwowanymi od połowy ubiegłego wieku – nieznacznym, statystycznie nieistotnym wzrostem rocznych sum opadu i brakiem statystycznie istotnych zmian w sezonach. Liczba dni z opadem przekraczającym 10 i 20 mm może nieco wzrosnąć od jesieni do wiosny. Wzrosty, choć procentowo duże, w bezwzględnych liczbach oznaczają od 1 do 5 więcej takich dni w sezonie, ponieważ obecnie, poza późną wiosną i latem, dni z takim opadem są rzadkością. Latem liczba dni z wysokim opadem prawdopodobnie spadnie. To również jest zgodne z obecnie obserwowanymi trendami.

Wysoka zgodność prognoz wiążkowych z obserwacjami, w sytuacji gdy większość czasu od okresu referencyjnego do scenariuszowego jest już za nami, zwiększyła zaufanie do scenariuszy wiążkowych, a stawia pod znakiem zapytania wiarygodność scenariuszy otrzymanych na drodze statystycznego lub dynamicznego downscalingu wyników model ECHAMS run 1.

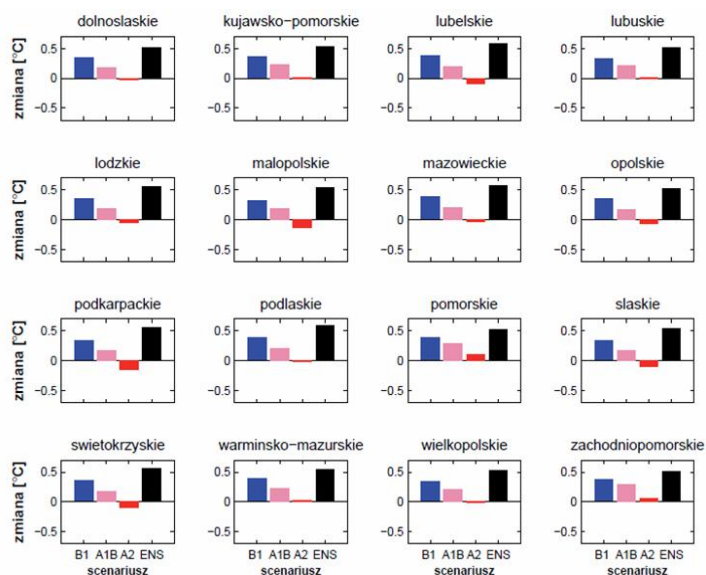
Poniżej przedstawiono – przykładowo – zmiany termiczne w województwach.

Dla scenariuszy emisji A2, A1B i B1 oraz dla scenariusza wiążkowego policzono dodatkowo zmianę średniej rocznej temperatury powietrza w każdym z 16 województw (rys. 1).

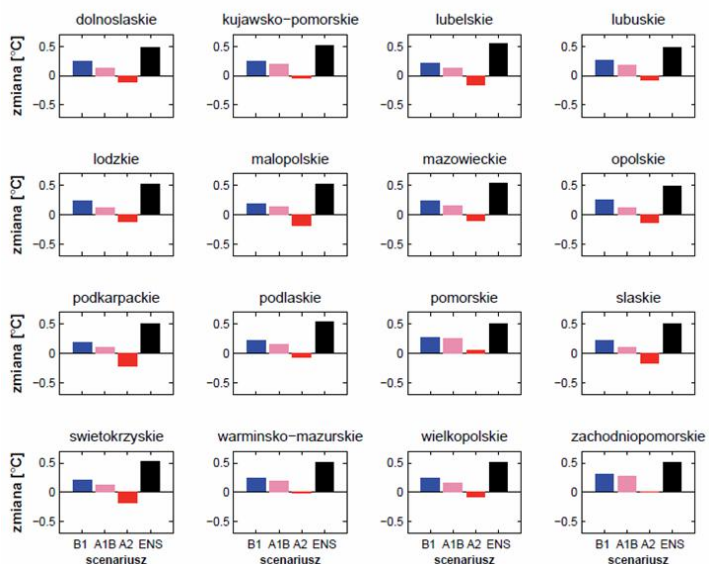
Symulacje IMGW prognozują nieznaczne ocieplenie. Gdyby sprawdzili się scenariusz emisji B1, symulacje przewidują ocieplenie o 0,3-0,4°C, w przypadku scenariusza emisji A1B przewidywane ocieplenie wyniosłoby 0,15-0,3°C, natomiast według scenariusza A2 temperatura nie powinna się zmienić, przewidywane różnice temperatury mieszczą się bowiem w granicach od -0,1°C do 0,1°C. Według scenariusza wiążkowego średnia temperatura roku wzrośnie we wszystkich województwach. Na przeważającym obszarze kraju ocieplenie wyniesie 0,5°C. Na

wschodzie i południu kraju, w województwach mazowieckim, warmińsko-mazurskim, świętokrzyskim, lubelskim, śląskim, małopolskim, podkarpackim i podlaskim wzrost temperatury będzie nieco większy i wyniesie  $0,6^{\circ}\text{C}$ .

Dla temperatury maksymalnej scenariusz wiązkowy przewiduje jej wzrost o  $0,5^{\circ}\text{C}$  na terenie całego kraju oprócz województw: mazowieckiego, podlaskiego i lubelskiego, w których temperatura maksymalna będzie wyższa o  $0,6^{\circ}\text{C}$  (rys. 2). Symulacje IMGW i w tych przypadkach przewidują mniejsze ocieplenie. W przypadku scenariusza emisji B1 jest to  $0,15-0,25^{\circ}\text{C}$ , dla scenariusza A1B –  $0,1-0,2^{\circ}\text{C}$ .

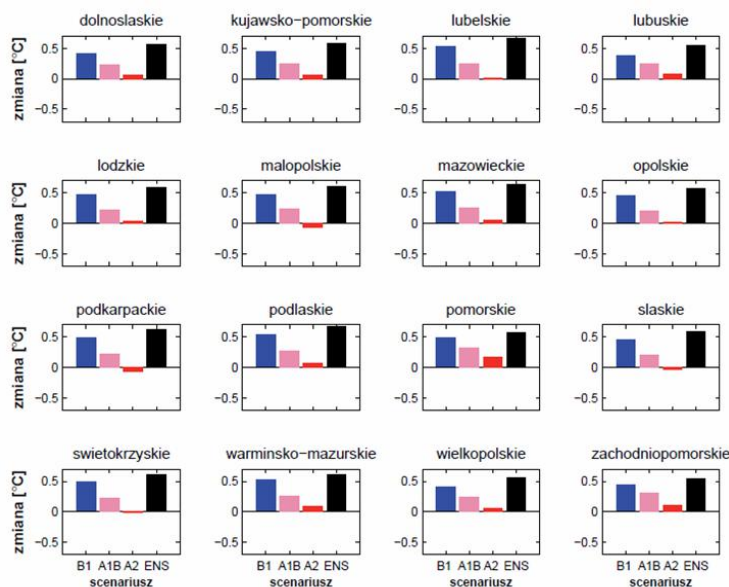


Rys. 1. Zmiany średniej rocznej temperatury wg scenariusza IMGW-B1 (niebieski), IMGW-A1B (różowy), IMGW-A2 (czerwony), wiązkowego (czarny)



Rys. 2. Zmiany średniej maksymalnej temperatury wg scenariusza IMGW-B1 (niebieski), IMGW-A1B (różowy), IMGW-A2 (czerwony), wiązkowego (czarny)





Rys. 3. Zmiany średniej minimalnej temperatury wg scenariusza IMGW-B1 (niebieski), IMGW-A1B (różowy), IMGW-A2 (czerwony), wiązkowego (czarny)

Scenariusz A2 dla trzynastu województw przewiduje niewielki spadek temperatury maksymalnej (do 0,2°C), dla dwóch wzrost o około 0,1°C, a dla województwa warmińsko-mazurskiego brak zmian.

Dla temperatury minimalnej scenariusz wiązkowy przewiduje wzrost o 0,5°C na terenie województw: zachodniopomorskiego, lubuskiego i dolnośląskiego, o 0,6°C dla województw: pomorskiego, wielkopolskiego, kujawsko-pomorskiego, łódzkiego, opolskiego i śląskiego. W pozostałych województwach temperatura minimalna wzrośnie o około 0,7°C (rys. 3). Symulacje IMGW przewidują mniejsze ocieplenie. W przypadku scenariusza emisji B1 jest to 0,4-0,5°C, dla scenariusza A1B – 0,2-0,3°C. Scenariusz A2 przewiduje niewielki spadek temperatury minimalnej (mniejszy niż 0,1°C) w województwach podkarpackim i śląskim, brak zmian w województwach świętokrzyskim i lubelskim oraz niewielki wzrost, nieprzekraczający 0,15°C, dla pozostałych województw.

## II. Reakcja i wrażliwość gospodarki na zmiany klimatu

O tym, że pogoda ma wpływ na gospodarkę powszechnie wiadomo. Jak wynika z danych Departamentu Handlu Stanów Zjednoczonych 12% produktu krajowego brutto (PKB) jest bezpośrednio wrażliwe na zmiany pogody o charakterze niekatastrofalnym. Stąd możemy mówić o „ryzyku pogodowym”, zarządzaniu nim i rozwijającym się rynku „umów na pogodę” w firmach ubezpieczeniowych.

„Odpowiedzi” poszczególnych sektorów gospodarki na zmiany klimatu mają inny przebieg. Są to zmiany powolne, a gdy odnieść je do koncentracji gazów cieplarnianych to reakcje klimatu na nie następują z dużym opóźnieniem. Także pro-

ces adaptacji gospodarki, dobrze zaplanowany, może być realizowany systemowo, przy rozłożonych na dłuższy okres kosztach działań dostosowawczych.

Do sektorów najbardziej wrażliwych na zmiany klimatu należy zaliczyć: energetykę, budownictwo, rolnictwo, turystykę i rekreację.

Sektor energetyczny reaguje na zmiany bezpośrednio. Im wyższa temperatura powietrza, tym większe zużycie energii przez systemy klimatyzacyjno-wentylacyjne, a im niższa, tym większe staje się zapotrzebowanie na energię do ogrzania pomieszczeń. Zmiany klimatyczne mogą doprowadzić do redukcji przepływu w rzeckach wykorzystywanych do chłodzenia urządzeń w elektrowniach ciepłych i nuklearnych. Może także nastąpić zmiana reżimu hydrologicznego rzek, co zakłóci pracę elektrowni wodnych.

Sektor budownictwa może stanąć przed problemem niedostatecznej wytrzymałości konstrukcji, nieodpowiednich materiałów oraz niedostosowanych norm budowlanych do bardzo silnych wiatrów i obciążeń konstrukcji śniegiem.

Sektor rolnictwa musi się liczyć ze zmianami w hodowli roślin i modyfikacją agrotechniki przez zmiany w doborze uprawianych gatunków roślin czy rejonizacji produkcji. Istnieją udokumentowane dowody, że niektóre choroby zakaźne zwierząt (zwłaszcza przenoszone przez owadziech wektorów cechujących się sezonowością, co jest związane z ociepleniem klimatu) są konsekwencją zmiennych warunków dla wegetacji roślin i bytowania zwierząt. W tej sytuacji sektor rolniczy musi liczyć się z podjęciem specjalistycznych prac adaptacyjnych nad epidemiologią chorób zakaźnych zwierząt domowych.

Turystyka i rekreacja. Ośrodki górskie mogą być narażone przede wszystkim na wysoką temperaturę powietrza lub brak opadów śniegu w sezonie zimowym. Z kolei ośrodki nadmorskie polskiego wybrzeża mogą zyskać ze względu na ocieplanie wód Bałtyku.

### **III. Zadania dla sektorów gospodarki odpowiedzialnych za przeważającą część krajowej emisji gazów cieplarnianych**

Klimat Ziemi jest zjawiskiem zmiennym i złożonym, a wpływa na niego wiele czynników. Na obecnym etapie rozpoznania nie jesteśmy w stanie jednoznacznie określić, w jakim stopniu ocieplenie powietrza na powierzchni Ziemi jest spowodowane procesami energetycznymi działalności człowieka, a w jakim czynnikami naturalnymi, w tym zjawiskami zachodzącymi na powierzchni Słońca.

Źle realizowane przez człowieka procesy energetyczne najbardziej szkodzą tu i teraz, dlatego należy podejmować kompleksowe działania ochronne, adaptacyjne i łagodzące skutki, tzn.:

- rozwijać nowe technologie, racjonalniej wykorzystujące surowce energetyczne,
- racjonalnie oszczędzać energię,
- ograniczać emisję gazów cieplarnianych oraz zwiększać ich absorpcję,
- ograniczyć zużycie nieodnawialnych źródeł energii na rzecz źródeł odnawialnych,

- ograniczać emisję toksyczną pochodzącą z różnych źródeł transportu, upowszechniać w społeczeństwie ekologiczne środki transportu, w tym rowery,
- szeroko stosować handel emisjami,
- wprowadzać mechanizmy finansowe wspierające działania zmierzające do redukcji emisji gazów cieplarnianych,
- prowadzić ciągłą działalność edukacyjną, szkoleniową, obejmującą całe społeczeństwo, wszystkie grupy wiekowe i zawodowe, a także władze na szczeblu centralnym i lokalnym.

W szczególności należy podjąć następujące działania na rzecz redukcji gazów cieplarnianych:

#### w przemyśle

- modernizować technologie produkcji, m.in. przez wdrażanie najlepszych praktyk, wprowadzać innowacje i poprawiać wydajność,
- ograniczać zużycie energii i innych mediów na jednostkę produktu,
- stosować zamiennik F-gazów w urządzeniach chłodniczych i klimatyzacyjnych,
- wprowadzać nowoczesne metody zarządzania i kontroli,

#### w energetyce i w budownictwie

- rozwijać różne formy produkcji energii ze źródeł odnawialnych: woda, wiatr, słońce, biogaz, odpady drewna, geotermia (w tym energetyka rozproszona),
- wprowadzać różne mechanizmy finansowe wspierające produkcję energii z odnawialnych źródeł energii,
- rozszerzać wydawanie świadectw energetycznych budynkom, dotyczących wymagań techniczno-budowlanych dla racjonalnego wykorzystania energii w zakresie ochrony cieplnej, instalacji grzewczej, wentylacji i klimatyzacji,

#### w transporcie

- stosować rozwiązania techniczne takie jak:
  - nowoczesne konstrukcje samochodowe, szynowe i samolotowe, ograniczające zużycie paliw,
  - budowa autostrad, dróg szybkiego ruchu i obwodnic,
  - budowa infrastruktury rowerowej i upowszechnianie roweru jako ekologicznego środka transportu,
- stosować rozwiązania organizacyjne takie jak:
  - programy zachęcające do stosowania biopaliw,
  - promocja transportu publicznego,

#### w rolnictwie i leśnictwie

- stosować szerzej bioetanol do napędu maszyn rolniczych i transportu,
- wdrażać najlepsze (dobre) praktyki w rolnictwie, m.in. w technologiach upraw i hodowli (wychwytywanie metanu),
- w drodze stopniowego, długotrwałego procesu dostosowawczego przygotować programy adaptacji rolnictwa, głównie w Polsce północno-wschodniej (gdzie

obserwowany jest trend rosnący średniej temperatury powietrza i wydłużenie okresu wegetacyjnego), w zakresie zmian w hodowli roślin, modyfikacji, agrotechniki, zmian w doborze uprawnych gatunków roślin i rejonizacji produkcji,

- racjonalnie stosować nawozy sztuczne,
- stosować zachęty i działania wspierające zalesienia oraz odnowienia zasobów leśnych w lasach prywatnych,

w gospodarce komunalnej

- zmniejszać energochłonność urządzeń do uzdatniania wody i przepompowni, ograniczać koszty energetyczne przesyłu wody do odbiorców,
- obniżać energochłonność oczyszczalni ścieków, wdrażać produkcję gazu i energii z osadów ściekowych,
- aktywizować odzysk i recykling odpadów wraz z pozyskiwaniem gazu z wysypisk.

#### **IV. Działania adaptacyjne do prawdopodobnych zmian klimatycznych**

W gospodarce wodnej działania adaptacyjne to:

- przede wszystkim dbałość o zasoby wodne tak, aby w przyszłości zaspokojone były potrzeby wodne ludności, rolnictwa, gospodarki żywnościowej i przemysłu. W szczególności chodzi o monitorowanie zmian bilansu wodnego (jakości i ilości) w celu przewidywania potencjalnych zmian tego bilansu w przyszłości, w tym cech biologicznych, fizycznych i chemicznych ekosystemów wodnych,
- ograniczanie ryzyka strat spowodowanych przez powódzie i susze,
- odtwarzanie i tworzenie małej retencji, szerokie działania renaturyzacyjne,
- budowa zbiorników retencyjnych dla uzyskania przepływów dyspozycyjnych w rzekach oraz zaopatrzenia w wodę hydroenergetyki, rybołówstwa, transportu, turystyki i rekreacji.

Działania adaptacyjne dotyczące polskiej strefy Bałtyku to:

- zabezpieczenie wrażliwych obszarów wybrzeża (ok. 2400 km<sup>2</sup>) przed ryzykiem zagrożenia powodzią związanymi z podniesieniem się poziomu wód Bałtyku,
- zapewnienie stabilizacji linii brzegowej: plaż, klifów i wydmy przed erozją morza.

#### **V. Ryzyko działań strategicznych dotyczących zmian klimatu**

##### **VI.A. Straty spowodowane ekstremalnymi (lokalnymi) zjawiskami pogodowymi**

Z dużym prawdopodobieństwem można założyć, że spodziewane zmiany klimatu wielokrotnie pojawią się ekstremalnych zjawisk pogodowych, które

w efekcie mogą generować straty w gospodarce, a także narażać ludzi na utratę zdrowia i życia. Straty stanowią często poważny uszczerbek w budżecie państwa, a przedsiębiorców mogą narażać na utratę części lub całości trwałego majątku.

Straty powodziowe w Polsce były następujące:

Rok	1960	1970	1977	1979	1997	2001	2010
mln zł	1205	1515	2503	1995	12 000	1300	13 000

Poziom strat powodziowych rośnie w miarę wzrostu zainwestowania terenów.

## **VI.B. Scenariusze szans i niepowodzeń działań strategicznych związanych ze zmianami klimatu**

Patrząc w przyszłość można brać pod uwagę dwa scenariusze działań strategicznych związanych ze zmianami klimatu: scenariusz szans i scenariusz niepowodzeń.

W scenariuszu szans przystąpienie Polski do Unii Europejskiej i konieczność spełnienia dość surowych wymogów w zakresie standardów gospodarczo-społecznych i prawnych, niewątpliwie wymusza zmniejszenie emisji antropogenicznej gazów cieplarnianych, co będzie skutkowało również ograniczeniem zagrożeń wywołanych ekstremalnymi (lokalnymi) zjawiskami meteorologicznymi i hydrologicznymi. Łagodzenie zaś skutków zagrożeń naturalnych jest związane z bogaceniem się państwa i społeczeństwa. W takich warunkach należy się spodziewać zwiększania środków na monitoring, prace osłonowe oraz doskonalenie sprawności służb ratowniczych działających na rzecz ograniczenia skutków zagrożeń.

Gdyby przyjąć scenariusz niepowodzeń, a w nim wariant krytyczny, w którym nastąpi pogłębienie różnorodnych sytuacji kryzysowych, to należy się liczyć z utrwaleniem zacofania technologicznego. Skutkiem tego byłoby zwiększenie ryzyka powstawania katastrof i awarii technologicznych (powolnych i szybkich), zwiększenie ryzyka zagrożenia zdrowia i życia ludzi oraz powiększenia obszarów ekologicznego zagrożenia. Scenariusz niepowodzeń to także sytuacja, gdy z niezrozumiałych przyczyn następuje zaniechanie wszelkich działań ochronnych i adaptacyjnych do zmian klimatu.

Ponieważ zmiany klimatyczne to proces powolny i długotrwały, istnieją realne szanse, aby w ramach strategicznego planowania działań adaptacyjnych:

- zabezpieczyć środki finansowe,
- dostosować technologie,
- zmienić uregulowania prawne,
- pobudzać rozwój infrastruktury komunalnej i rolnej,
- zbudować nowe powiązania kooperacyjne,
- prowadzić prace nad zmianą mentalności ludzi w różnych strefach aktywności,
- przygotować bazę naukowo-badawczą wspierającą ww. działania.

W obydwu scenariuszach, wobec różnych uwarunkowań zewnętrznych i wewnętrznych, istnieje niepewność kierunku rozwoju kraju. Ryzyko i niepewność stanowią nieodłączny element procesów decyzyjnych, które ujawniają się szczególnie jaskrawo przy reagowaniu w warunkach tworzenia się sytuacji niebezpiecznej, wywołanej np. gwałtownym zdarzeniem pogodowym.

### **VI.C. Podejmowanie decyzji w warunkach niepewności**

W ostatnich latach obserwuje się dramatyczny, związany prawdopodobnie ze zmianami klimatu, wzrost zagrożeń wywołanych ekstremalnymi zjawiskami meteorologicznymi i hydrologicznymi.

Racjonalne reagowanie (zarządzanie, podejmowanie decyzji) w odniesieniu do tych zjawisk pogodowych powinno być związane z prewencją i kontrolą ryzyka zagrożenia (niebezpiecznego zdarzenia). Oznacza to, że po otrzymaniu informacji o możliwości zaistnienia zdarzenia podejmuje się decyzję, której celem ma być ograniczenie skutków zdarzenia, jego uniknięcie, bądź też tylko akceptacja jego wystąpienia.

W odniesieniu do zjawisk przyrody, o których tutaj mowa, ze względu na skomplikowany, nie w pełni poznany system przyczynowo-skutkowy kształtujący interesujące nas zjawiska i procesy, gdy trudno uzyskać w pełni obiektywny opis probabilistyki zjawiska, działamy w warunkach niepewności. Podejmowanie w takich warunkach decyzji może iść w trzech (i więcej) kierunkach:

Pierwszy polega na normatywnym sformułowaniu formy działania, ściśle określonym przez nadrzędną agencję rządową (np. sterowanie systemem wodnym zbiornika retencyjnego wg instrukcji, mimo że dynamiczny charakter retencji wskazywałby na potrzebę odstąpienia od instrukcji),

Drugi wiąże się ze stosowaniem specjalnych technik podejmowania decyzji, np. kwantyfikacja stopnia niepewności, wielokryterialne metody podejmowania decyzji, oceny ryzyka (np. aktywne podejście dyspozytora do systemu sterowania zbiornikiem w wyniku wielokrotnie powtarzanych symulacji opartych na ciągach historycznych),

Trzeci polega na całkowitej subiektywnej decyzji decydenta wynikającej z jego doświadczenia (np. wysadzenie wału przeciwpowodziowego) lub wręcz upodobań.

Warto jednak podkreślać, że obszar ryzyka odpowiadający danemu ekstremalnemu zdarzeniu przyrodniczemu lub inaczej obszar zmienności tego zjawiska meteorologicznego czy hydrologicznego można określić jedynie z pewnym przybliżeniem. Dlatego pomijanie w procesach decyzyjnych niepewności wynikającej z samej struktury (charakteru) zjawiska jest błędem prowadzącym często do wielkich szkód i zagrożenia życia.

### **VI.D. Działania w zakresie klęsk żywiołowych**

Degradacja środowiska związana z szybkim rozwojem gospodarczym, ale także ze zmianami klimatu zwiększa ryzyko wystąpienia katastrof naturalnych. Ponadto na skutek zwiększonej produkcji, rozwoju transportu i składowania oraz magazynowania niebezpiecznych odpadów są stwarzane dogodne warunki do wywołania klęsk (awarii) technologicznych.

Katastrofy Na-Tech (naturalno-techniczne), o charakterze synergicznym, często przekraczają naturalne granice swego powstawania i stanowią zwiększone zagrożenie dla ludności całych regionów. To z kolei określa potrzebę spojrzenia na

ryzyko wystąpienia klęsk żywiołowych przez pryzmat urbanizacji. Skutki katastrof mogą być zredukowane, ale tylko wtedy, gdy będą traktowane jako integralna część w planach przyznawania środków oraz racjonalnym zagospodarowaniu przestrzennym i urbanizacji. Planiści i specjaliści różnych dyscyplin powinni być zaangażowani w działania zapobiegające klęskom.

W prewencyjnym planowaniu rozwoju miast do uwzględnienia są 3 aspekty:

- duża podatność społeczności miejskich na zagrożenia Na-Tech spowodowana koncentracją ludności, akumulacją dobytku oraz silną zależnością od kluczowych urządzeń technicznych i infrastruktury, które wpływają na wielkość zagrożenia. Z tych przesłanek powinien wynikać dobór osłonowych środków inżynierskich i zakres planowania,
- konieczność sprawnej organizacji akcji prewencyjnych i ratowniczych z udziałem społeczności lokalnej (OC – treningi, szkolenia), także przy likwidacji strat,
- konieczność prowadzenia powszechnej edukacji o zagrożeniach.

Należy pamiętać, że każde działanie w tym zakresie ma znaczący wymiar ekonomiczny. Aby go zoptymalizować, celowe jest sformułowanie długofalowych zadań dla różnych dziedzin nauki i praktyki inżynierskiej.

W prewencyjnych działaniach na rzecz ochrony środowiska naturalnego należy surowo przestrzegać nieprzekraczania granicznych ładunków zanieczyszczeń wody, powietrza i gleby. Naruszenie tego reżimu spowoduje, że natura okaże się bezbronna, a zmiany będą nieodwracalne.

Zagrożenia naturalne i technologiczne stanowią stałe niebezpieczeństwo dla ludności, a ich skutki to duże straty w mieniu, infrastrukturze i środowisku. W związku z postępującym zainwestowaniem przestrzeni oraz zmianami klimatu, które zwiększają skutki zdarzeń niebezpiecznych, konieczne jest ciągle doskonalenie systemu osłony, ratownictwa i postępowania po klęsce. Konieczne jest kompleksowe i logistyczne podejście do tego problemu zarówno w zakresie badawczym, jak i operacyjnym.

Prowadzone prace badawcze i działania (wyjąwszy „gry polityczne”) powinny mieć jeden cel: zapewnić bezpieczeństwo wewnętrzne państwa i spowodować, by jego obywatele czuli, że są osłaniani przez odpowiednie organy władzy w krytycznych sytuacjach.

Niemniej ważna jest gotowość rządzących i ludności cywilnej do akceptacji zmian i dostosowania się do nich, w czym nieoceniona jest wiedza o zjawiskach i powszechna edukacja.

Z problematyką klimatu jest jak z historią (prehistorią) narodów. Nie ma i nie powinno być podziału na „kapłanów” i „wiernych”, a więc tych, co podają laikom pewne prawdy do wierzenia i tych, którzy muszą im na słowo honoru uwierzyć. Nie wszystko jest wyjaśnione, pozostaje mnóstwo problemów spornych, wśród nich i takie, w których nauka nigdy chyba nie wypowie swego ostatecznego zdania.

## **Wskaźniki realizacji osiągnięcia celów Projektu**

W wyniku realizacji Projektu zaistnieją przesłanki do:

- zwiększenia zasobów wód powierzchniowych poprzez zwiększenie retencji,
- uwzględnienia we wszystkich wojewódzkich planach zagospodarowania przestrzennego problemów gospodarki wodnej wobec zmian klimatu – jako ważnego uwarunkowania rozwoju regionu,
- wprowadzenia norm budowlanych uwzględniających zmiany obciążeń budowlanych w wyniku ekstremalnych warunków pogodowych (śnieg, wiatr),
- zmniejszania ryzyka susz i powodzi,
- wdrażania modeli do oceny poziomu emisji pyłu zawieszonego PM<sub>2,5</sub>,
- zwiększania dostępności do informacji o gwałtownych zanieczyszczeniach ujęć wody,
- opracowania propozycji edukacyjnych nawiązujących do Projektu,
- podniesienie jakości prognoz meteorologicznych przy użyciu modelu subsynoptycznoskalowego,
- uznania strefy brzegowej Bałtyku za rejon konfliktu między rozwojem gospodarczym a zachowaniem naturalnego krajobrazu wraz z istniejącymi geosystemami i dostosowanie do tego perspektywicznych planów zagospodarowania przestrzennego.

## **Wniosek generalny**

Nie rozpoznano do końca, na ile ocieplenie klimatu jest spowodowane działalnością człowieka, a na ile czynnikami naturalnymi. Nie oznacza to, że mamy nic nie robić. Wprost przeciwnie. Powinniśmy w ramach długofalowej strategii państwa ograniczyć ilość i stężenie dwutlenku węgla w powietrzu. Chodzi więc o taką modernizację energetyki, transportu, rolnictwa i gospodarki komunalnej, aby maksymalnie ograniczyć zużycie energii w ogóle, a tym samym – w przypadku Polski zaoszczędzić jak najwięcej zasobów węgla dla następnych pokoleń. Równocześnie powinniśmy intensyfikować produkcję energii opartą na czystych źródłach odnawialnej oraz energii jądrowej, i to mimo opóźniających te działania przedstawicieli przemysłu i lobby paliw kopalnych obawiających się utraty zysków. (Pewnym optymizmem napawa fakt zainteresowania się niektórymi polskimi spółkami energetycznymi budową nowych elektrowni i elektrociepłowni zasilanych gazem). Każdy krok w tym kierunku będzie krokiem do przodu naszej gospodarki.

W tym przypadku nie chodzi o wizjonerski świat, lecz o twarde chodzenie po ziemi.



## Spis treści

<b>WPROWADZENIE</b> .....	3
<i>Michał Ziemiański, Leszek Ośródka</i>	
<b>CZĘŚĆ I. NOWOCZESNE METODY DETEKcji I PROGNOZOWANIA ZAGROŻEŃ METEOROLOGICZNYCH</b>	
Możliwości i znaczenie produktów generowanych przez systemy teledetekcji naziemnej w zakresie interpretacji aktualnego stanu atmosfery .....	13
<i>Zdzisław Dziewit, Irena Tuszyńska, Paweł Rychlewski, Jan Szturc, Anna Jurczyk, Katarzyna Ośródka, Wojciech Gajda, Rafał Lewandowski</i>	
Dane z satelitów meteorologicznych w prognozowaniu i monitorowaniu groźnych zjawisk pogodowych .....	38
<i>Piotr Struzik, Bożena Łapeta, Rafał Iwański, Monika Pajek, Danuta Serafin-Rek</i>	
System analizy danych z modeli numerycznych oraz system asymilacji i analizy danych .....	67
<i>Andrzej Mazur, Witold Interewicz, Joanna Linkowska, Piotr Drzewiecki, Marek Łazanowicz, Grzegorz Duniec</i>	
System numerycznego prognozowania wysokiej rozdzielczości .....	86
<i>Małgorzata Szczęch-Gajewska, Marcin Kolonko, Marek Jerczyński</i>	
System weryfikacji rozmytej .....	97
<i>Bogdan Bochenek, Jadwiga Woyciechowska</i>	
<b>CZĘŚĆ II. NOWOCZESNE METODY MONITORINGU I PROGNOZOWANIA STANU ŚRODOWISKA ATMOSFERYCZNEGO</b>	
Problemy zanieczyszczeń powietrza .....	111
<i>Krzysztof Klejnowski, Wioletta Rogula-Kozłowska, Barbara Błaszczak, Leszek Ośródka, Ewa Krajny</i>	
System monitoringu jakości powietrza .....	125
<i>Barbara Toczko</i>	
Wybrane elementy oceny jakości powietrza .....	133
<i>Ewa Krajny, Leszek Ośródka, Krzysztof Klejnowski, Wioletta Rogula-Kozłowska</i>	

Pogoda chemiczna a meteorologia .....	147
<i>Leszek Ośródka, Marek Wojtylak, Ewa Krajny, Krzysztof Klejnowski</i>	
Fracja drobnych cząstek aerozolu atmosferycznego – możliwości monitorowania, ocena zagrożeń na podstawie badań eksperymentalnych .....	171
<i>Krzysztof Klejnowski, Leszek Ośródka, Ewa Krajny, Wioletta Rogula-Kozłowska, Barbara Błaszczak, Jadwiga Błaszczuk, Andrzej Krasa, Patrycja Rogula-Kopiec, Marek Wojtylak</i>	
Wpływ zanieczyszczeń powietrza na jakość życia – ocena zagrożeń i możliwości ograniczenia skutków. Propozycja działań adaptacyjnych .....	224
<i>Leszek Ośródka, Ewa Krajny, Krzysztof Klejnowski, Wioletta Rogula-Kozłowska</i>	
<b>PODSUMOWANIE</b> .....	232
<i>Michał Ziemiański, Leszek Ośródka</i>	

## **Wprowadzenie**

*Michał Ziemiański, Leszek Ośródk*

Rzeczywisty rozwój badań nad klimatem doprowadził do istotnej zmiany w sposobie rozumienia stanu atmosfery. Reprezentowanie stanu atmosfery przez klasyczne elementy meteorologiczne takie jak wiatr, temperatura, zachmurzenie, zjawiska meteorologiczne, etc. okazało się niewystarczające. Mechanizmy odpowiedzialne za zmiany klimatu są rezultatami procesów zachodzących w szerszym rozumianym środowisku atmosferycznym, które obok klasycznych elementów obejmuje także atmosferyczne domieszki gazowe oraz zawieszone w nim cząstki stałe lub płynne (aerozole). Te dodatkowe elementy mają zasadniczy wpływ na procesy klimatyczne, głównie poprzez efekty radiacyjne. Aerozole biorą także udział w skomplikowanych interakcjach z takimi klasycznymi elementami klimatycznymi jak zachmurzenie i opady (por. np. [Forster i in. 2007]). Istotne jest zatem szeroko rozumiane, tworzące funkcjonalną całość, środowisko atmosferyczne obejmujące meteorologiczne i chemiczne (związane z aktywnymi radiacyjnie gazowymi składnikami atmosfery i zawieszonymi w niej aerozolami) aspekty stanu atmosfery, wpływające na siebie oraz zmieniające się w klimatologicznych skalach czasowych.

Podobne podejście, oparte na traktowaniu bieżącego stanu środowiska atmosferycznego jako całości, staje się także obecne we współczesnej analizie procesów atmosferycznych o skalach czasowych charakterystycznych dla pogody. I tak, współczesne badania pozwoliły na lepsze zrozumienie chemicznych aspektów pogody, przede wszystkim co do jakości powietrza, oraz ich praktycznego znaczenia dla społeczności ludzkich. Wykazały one także istotne współdziałanie meteorologicznych i chemicznych aspektów pogody. Z jednej strony dotyczy to uzależnienia pogody chemicznej od meteorologicznych aspektów stanu atmosfery takich jak temperatura, zachmurzenie, stabilność, prędkości i kierunki wiatru [Kukkonen i in. 2012]. Z drugiej strony dotyczy istotnego wpływu chemicznych aspektów pogody (zwłaszcza aerozoli) na procesy pogodotwórcze związane z powstawaniem chmur i opadów (por. np. [McComiskey i in. 2009] jako studium obserwacyjne oraz [Xue i in. 2008] jako studium oparte na symulacjach z wykorzystaniem modelowania numerycznego). Zatem także w skali czasowej charakterystycznej dla procesów pogodowych istotną rolę odgrywa całościowo rozumiane środowisko atmos-

feryczne, w którym zachodzą skomplikowane interakcje decydujące zarówno o meteorologicznie, jak i chemicznie rozumianych aspektach pogody.

Ścisły związek meteorologicznych i chemicznych czynników stanu atmosfery, współdziałających jako elementy jednego środowiska atmosferycznego, znajduje odbicie w wielu współczesnych przedsięwzięciach związanych z badaniem, monitorowaniem i prognozowaniem stanu tego środowiska. Działania te kładą szczególny nacisk na monitorowanie i prognozowanie sytuacji niebezpiecznych. Tak jak ekstrema meteorologicznie rozumianej pogody (bardzo silne wiatry, ekstremalne opady, fale ciepła lub mrozu) prowadzą do powstawania sytuacji niebezpiecznych dla zdrowia i życia ludzi, podobne skutki mają ekstrema pogody chemicznej charakteryzujące się istotnym pogorszeniem jakości powietrza.

Dostrzegając narastający problem zanieczyszczeń powietrza w Europie, Komisja Unii Europejskiej w swym komunikacie dla Rady i Parlamentu Europejskiego: Strategia tematyczna dotycząca zanieczyszczenia powietrza [COM(2005)446] ogłosiła, że: „Zanieczyszczenie powietrza jest problemem zarówno lokalnym, jak i transgranicznym, spowodowanym przez emisję pewnych substancji, które albo ze swej natury albo w wyniku reakcji chemicznej wywierają negatywny wpływ na środowisko i zdrowie. W odniesieniu do zdrowia, ozon troposferyczny i pył zawieszony („pył drobnocząsteczkowy”) stanowią największe zagrożenie spośród substancji zanieczyszczających. Narażenie na działanie tych substancji może mieć skutki o różnym zasięgu: od niewielkich zaburzeń ze strony układu oddechowego po przedwczesny zgon. (...) Pył zawieszony może być emitowany bezpośrednio do powietrza (tzw. cząstki pierwotne) lub też może powstawać w powietrzu atmosferycznym jako „cząstki wtórne” z gazów takich jak dwutlenek siarki (SO<sub>2</sub>), tlenki azotu (NO<sub>x</sub>) i amoniak (NH<sub>3</sub>). (...) Nawet, jeśli obecnie istniejące przepisy zostaną w pełni wdrożone, problemy związane ze stanem zdrowia i środowiska będą nadal odczuwalne w 2020 r., jeżeli nie zostaną podjęte dalsze działania”.

Współczesne prawo ekologiczne w Polsce [Ustawa ... 2001] jest zgodne z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy [Dyrektywa 2008/50/WE], która została uchwalona między innymi w celu określenia nowych standardów jakości powietrza, umożliwiających uniknięcie lub zminimalizowanie szkodliwych skutków dla zdrowia człowieka i środowiska jako całości.

Badania prowadzone w ośrodkach miejsko-przemysłowych, charakteryzujących się wysokimi stężeniami zanieczyszczeń i niekorzystnymi warunkami tzw. klimatu dyspersyjnego wykazały, że istnieje silny związek między warunkami sanitarnymi powietrza (w tym stężeniami alergenów) a stanem zdrowia populacji.

Według Komunikatu Komisji dla Rady i Parlamentu Europejskiego dotyczącego strategii tematycznej w sprawie środowiska miejskiego [COM(2006)718] „Obszary miejskie odgrywają istotną rolę w osiągnięciu celów strategii zrównoważonego rozwoju UE”. Wiadomo także, że obszary, o których mowa w komunikacie, są zamieszkiwane bądź są miejscem, gdzie spędza znaczną część życia ponad 80% mieszkańców Europy. Niezbędne są, zatem działania zmierzające do powstrzymania lub naprawy dotychczasowych skutków degradacji ekologicznej.

Wyzwania w zakresie ochrony środowiska, przed którymi stają miasta niosą za sobą istotne skutki dla zdrowia populacji, jakości życia mieszkańców oraz wyników gospodarczych samych miast. Większość miast europejskich, a zatem i polskich staje przed problemem niskiej jakości powietrza, nadmiernego ruchu samochodowego, zatorów transportowych, wysokiego poziomu hałasu, niskiej jakości stanu środowiska architektonicznego, emisji zanieczyszczeń (w tym znacznej ilości gazów cieplarnianych), bezładnej zabudowy miejskiej, nadmiaru wytworzonych odpadów i ścieków. Przyczyny te prowadzą także do trudno odwracalnych zmian klimatu lokalnego miast, których przykładem jest występowanie tak zwanej miejskiej wyspy ciepła.

Powszechnie uznaje się, że największe sukcesy w zakresie zrównoważonego rozwoju środowiska miejskiego można osiągnąć poprzez zintegrowane podejście do zarządzania tym środowiskiem wyrażone między innymi w akceptowaniu i realizowaniu działań długo-, średnio- i krótkoterminowych zmierzających do ograniczenia skutków takiego stanu rzeczy. Formy proponowanych działań zalecane przez Komisję UE to międzyinstytucjonalna współpraca oraz realizacja projektów demonstracyjnych, dotyczących szeregu kwestii związanych ze środowiskiem miejskim oraz prowadzenie działań monitorujących postęp prac w tym zakresie. Szczegóły tych przedsięwzięć omawia obok wspomnianego Komunikatu [COM(2006)718] także Dyrektywa 2008/50/WE stanowiąca w zasadzie strategię tematyczną dotyczącą zanieczyszczenia powietrza.

Ścisła współzależność chemicznych i meteorologicznych aspektów środowiska atmosferycznego była podstawą szeregu międzynarodowych przedsięwzięć nakierowanych na monitorowanie i prognozowanie stanu tego środowiska, zwłaszcza w kontekście występowania sytuacji niebezpiecznych. Należy tu podkreślić europejskie inicjatywy w tym zakresie, takie jak szeroko zakrojony projekt Global Monitoring for Environment and Security (GMES) prowadzony przez European Space Agency (ESA), którego celem jest operacyjne monitorowanie i prognozowanie stanu środowiska atmosferycznego za pomocą danych satelitarnych i pomiarów in-situ, a także wykorzystujący wyspecjalizowany system prognoz (ECMWF-GEMS). Istotną rolę odgrywają też takie projekty europejskie jak MEGAPOLI, CITYZEN, EUCAARI, EUSAAR, ACTRIS oraz szereg innych działań, w tym akcje COST.

Prace prowadzone w ramach projektu KLIMAT wpisują się w tak rozumiany paradygmat diagnozy i prognozy stanu środowiska atmosferycznego [por. Kukkonen i in. 2012]. Ze względu na najistotniejsze potrzeby społeczne, które stały się także podstawą wymienionych europejskich inicjatyw w tej dziedzinie, prace te dotyczyły przede wszystkim rozwoju narzędzi służących do diagnozy oraz prognozy niebezpiecznych zjawisk pogody meteorologicznej i chemicznej, a także metod i wyników ich stosowania.

Działania podjęte w ramach projektu KLIMAT były nakierowane na ograniczanie skutków przewidywanych niekorzystnych zmian klimatu. Wiele prac badawczych analizujących skutki zmian klimatu, w tym także prace prowadzone w ramach projektu KLIMAT [Lorenc i in. 2012] sugeruje, że zmiany te mogą

wpływać także na wzrost częstości występowania i intensywności istotnych zjawisk pogodowych. Wyniki te zgodne są z innymi tego typu badaniami, przedstawionymi np. w raporcie IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change [por. Meehl i in. 2007]). Dotyczy to pogody rozumianej zarówno meteorologicznie, jak i chemicznie. Przykładami mogą być szczególnie intensywne zjawiska konwekcyjne czy epizody gwałtownego pogorszenia jakości powietrza podczas występowania fal ciepła. Możliwość wczesnego i precyzyjnego ostrzegania przed tego typu groźnymi zjawiskami staje się jeszcze bardziej istotna i pilna w kontekście przewidywanych zmian klimatycznych.

Niniejsza monografia przedstawia, z konieczności wybrane, wyniki prac badawczych zrealizowanych w ramach projektu KLIMAT nakierowanych na monitorowanie i diagnozowanie całościowo rozumianego stanu środowiska atmosferycznego, a w szczególności na ekstremalne i niebezpieczne zjawiska meteorologiczne i chemiczne. Prezentowane prace powstały w ramach realizacji zadań *Rozwój metod prognozowania i systemów ostrzegania przed groźnymi zjawiskami hydrologicznymi i meteorologicznymi oraz wykorzystanie ich do osłony kraju* oraz *„Stan zanieczyszczeń powietrza w Polsce i ich wpływ na jakość życia – możliwości ograniczenia skutków*.

W części I związanej z monitorowaniem i prognozą pogody meteorologicznej, prowadzone prace dotyczyły rozwoju nowoczesnych narzędzi pomiarowych i symulacyjnych. Prace te miały przede wszystkim charakter metodyczny, tzn. były nakierowane głównie na rozwój metod wykrywania oraz prognozowania tego typu zjawisk, co znajduje odzwierciedlenie w zaprezentowanych wynikach. Jednocześnie autorzy starali się także ilustrować wykorzystanie rozwijanych przez siebie metod do analizy rzeczywistych sytuacji meteorologicznych, zwłaszcza związanych z występowaniem zjawisk, na których intensywność lub częstość występowania mogą wpływać spodziewane zmiany klimatu.

I tak, w dziedzinie monitorowania stanu atmosfery, prace miały na celu rozwój metod wykrywania potencjalnie niebezpiecznych sytuacji pogodowych za pomocą metod teledetekcji naziemnej, obejmujących pomiary radarowe oraz wykorzystujących system detekcji wyładowań atmosferycznych, oraz metod teledetekcji satelitarnej wykorzystujących rosnącą flotę satelitów meteorologicznych o zróżnicowanych parametrach orbitalnych oraz systemach pomiarowych. Wybrane wyniki tych prac przedstawiono w rozdziałach *Możliwości i znaczenie produktów generowanych przez systemy teledetekcji naziemnej w zakresie interpretacji aktualnego stanu atmosfery* oraz *Dane z satelitów meteorologicznych w prognozowaniu i monitorowaniu groźnych zjawisk pogodowych*. W pierwszym z tych rozdziałów dokonano szerokiego przeglądu produktów systemu radarowego i systemu detekcji wyładowań, a także produktów nowcastingowego systemu Nimrod przetwarzającego dane radarowe, pozwalających na detekcję niebezpiecznych zjawisk atmosferycznych. Zaprezentowano także możliwości tworzenia niestandardowych produktów opartych na analizie sygnału radarowego, umożliwiających lepszą automatyczną detekcję takich zjawisk. W drugim z rozdziałów przedstawiono szeroką gamę produktów satelitarnych pozwalających na subiektywną oraz automatycz-

ną detekcję niebezpiecznych zjawisk pogodowych. Dotyczy to przede wszystkim zjawisk burzowych, które mogą być monitorowane za pomocą danych satelitar-nych zarówno na etapie wykrywania potencjalnych możliwości wystąpienia głąbokiej konwekcji, jak i na etapach początkowej oraz rozwiniętej fazy rozwoju takiej konwekcji. Prezentowane są także narzędzia do satelitarnego monitorowania niebezpiecznych sytuacji meteorologicznych związanych z występowaniem mgieł i niskich chmur oraz obszarów silnych wiatrów, także w środkowej i wysokiej troposferze.

W prognozowaniu pogody szczególną rolę odgrywają numeryczne modele pogody, które są podstawowym narzędziem pozwalającym na wiarygodne operacyjne prognozy pogody oraz wczesne ostrzeżenie przed potencjalnie niebezpiecznymi sytuacjami meteorologicznymi. Rozwój szeroko rozumianych metod modelowania numerycznego pozwala zatem na lepsze i dokładniejsze prognozy, w tym prognozy niebezpiecznych lub szczególnie istotnych zjawisk meteorologicznych, a także warunków meteorologicznych sprzyjających występowaniu niebezpiecznych sytuacji związanych z pogodą chemiczną. Prace wykonane w ramach realizacji projektu KLIMAT obejmowały wprowadzenie nowoczesnych metod asymilacji danych do praktyki operacyjnego numerycznego prognozowania pogody za pomocą modelu COSMO. Rozdział *System analizy danych z modeli numerycznych oraz system asymilacji i analizy danych* dokumentuje poprawę wyników prognoz uzyskaną w wyniku tej implementacji. Prowadzone prace obejmowały także eksperymentalną i quasi-operacyjną implementację mezoskalowego modelu prognoz pogody AROME o rozdzielczości poziomej 2,7 km dla południowej Polski. Modele o takiej rozdzielczości stanowią nową jakość w numerycznym prognozowaniu pogody, ponieważ umożliwiają reprezentację na obliczeniowej siatce modelu procesów głębokiej konwekcji odpowiedzialnej za szczególnie niebezpieczne zjawiska meteorologiczne. Wyniki tych prac przedstawiono w rozdziale *System numerycznego prognozowania wysokiej rozdzielczości*. Jednocześnie z pracami nad wprowadzeniem konwekcyjnoskalowego modelu AROME prowadzone były prace nad rozwojem i implementacją nowoczesnych metod weryfikacji wyników numerycznych modeli pogody. W wyniku tych prac możliwe było obiektywne porównanie wyników modelu AROME oraz klasycznego obecnie mezoskalowego modelu pogody ALADIN pracującego w rozdzielczości poziomej 13 km. Prace te oraz ich wyniki przedstawione zostały w rozdziale *System weryfikacji rozmytej*.

Emitowane do atmosfery pierwotne pyły oraz generowane w wyniku przemian chemicznych prekursorów gazowych, cząstki wtórne, oprócz efektów ekotoksycznych odgrywają kluczową rolę w przebiegu szeregu procesów termodynamicznych w atmosferze, W konsekwencji cząstki stałe są ważnym elementem w analizie czynników kształtujących klimat i mikroklimat dużych obszarów.

Rola antropogenicznych emisji gazowych zanieczyszczeń ma bogatą dokumentację, natomiast rola zanieczyszczeń pyłowych nie jest do końca jednoznacznie zbadana i udokumentowana. Z tego powodu realizacja zadania pn: *Stan zanieczyszczeń powietrza w Polsce i jego wpływ na jakość życia – możliwości ograni-*

czenia skutków projektu KLIMAT była nakierowana głównie na problematykę związaną z zanieczyszczeniami pyłowymi zakładając, że obecnie jest to również zagadnienie priorytetowe w ochronie powietrza ze względu na skalę problemu w środkowo-wschodniej Europie.

Prowadzone badania zmierzały do określenia relacji między zanieczyszczeniem pyłowym powietrza a zespołem czynników meteorologicznych w sytuacji obserwowanych zmian klimatu, przy wykorzystaniu w sposób maksymalny istniejącej infrastruktury do badań zanieczyszczeń atmosfery. Prace były prowadzone w dwóch płaszczyznach: diagnostyczno-modelowej i eksperymentalnej.

Celem badań realizowanych w pierwszej płaszczyźnie było przedstawienie problemów i metod monitoringu jakości powietrza jako elementu Państwowego Monitoringu Środowiska (PMS) (część II, rozdz. *Problemy zanieczyszczeń powietrza* oraz *System monitoringu jakości powietrza*), zidentyfikowanie dostępności i stopnia pokrycia obszaru kraju wynikami pomiarów składu fizykochemicznego atmosfery oraz dokonanie diagnozy sytuacji sanitarnej powietrza Polski przy wykorzystaniu kompleksowego wskaźnika czystości powietrza – jego indeksu jakości (część II, rozdz. *Wybrane elementy oceny jakości powietrza*). Udowodniono, że spośród wszystkich monitorowanych substancji pył zawieszony i ozon tworzą największe zagrożenie. Uznano przy tym, że zanieczyszczenia pyłowe stanowią zagadnienie priorytetowe w ochronie powietrza ze względu na skalę problemu w Europie środkowo-wschodniej i tym problemom poświęcono resztę opracowania. Na przykładzie zachowań pyłu w atmosferze badano wpływ warunków meteorologicznych na powstawanie epizodów wysokich stężeń zanieczyszczeń i zarekomendowano metodykę krótkoterminowej prognozy pogody chemicznej wykorzystującą empiryczne związki zanieczyszczenia powietrza z meteorologią w oparciu o numeryczne prognozy pogody (część II, rozdz. *Pogoda chemiczna a meteorologia*). Celem badań eksperymentalnych była próba określenia zróżnicowania właściwości fizycznych i chemicznych zanieczyszczeń pyłowych na podstawie badań wykonanych w Zabrze i Raciborzu w 2010 roku w obszarach o różnym stopniu narażenia w aspekcie zróżnicowanych warunków meteorologicznych. Zbadano możliwości wykorzystania nowoczesnych technik pomiarowych do interpretacji powstawania i rozwoju epizodów wysokich stężeń zanieczyszczeń oraz dokonano oceny wdrażania nowych technik badań zanieczyszczeń atmosfery, w kontekście realizacji zadań w zakresie ocen jakości powietrza (część II, rozdz. *Frakcja drobnych cząstek aerozolu atmosferycznego ...*). Zaproponowano listę działań naprawczych i adaptacyjnych zwracając szczególną uwagę zarówno na konieczność dalszych kompleksowych badań jak też i potrzebę podjęcia określonych rozwiązań systemowych w różnych sektorach gospodarki i życia społecznego dla poprawy stanu jakości powietrza także w aspekcie zmian klimatu (część II, rozdz. *Wpływ zanieczyszczeń powietrza na jakość życia ...*).

Projekt KLIMAT, prowadzony w IMGW-PIB i poświęcony wpływowi zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo, pozwolił na rozwój i przygotowanie narzędzi, które umożliwią lepsze reagowanie na spodziewane w przyszło-



ści częstsze występowanie niebezpiecznych stanów środowiska atmosferycznego, w tym na jego szybszą i dokładniejszą diagnozę oraz lepszą i bardziej precyzyjną prognozę. Zapewni to lepsze, sprawniejsze i bardziej wiarygodne informowanie społeczeństwa o występowaniu takich sytuacji.

#### **Literatura**

- COM(2005)446 Komunikat Komisji dla Rady i Parlamentu Europejskiego, Strategia tematyczna dotycząca zanieczyszczenia powietrza z 21.9.2005
- COM(2006)718 Komunikat Komisji dla Rady i Parlamentu Europejskiego dotyczący strategii tematycznej w sprawie środowiska miejskiego z 11.1.2006
- Dyrektywa 2008/50/WE, Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy (Dz. Urz. UE L 152 z 11.6.2008)
- Forster P. i in., 2007, Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. [In:] 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. i in (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Kukkonen J. i in., 2012, A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 1–87
- Lorenc i in., 2012, Klęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju, pod redakcją H. Lorenc, IMGW-PIB Warszawa, s. Monografie IMGW-PIB
- McComiskey A. i in., 2009, An assessment of aerosol-cloud interactions in marine stratus clouds based on surface remote sensing, *Journal of Geophysical Research*, 114
- Meehl G.A. i in., 2007, Global Climate Projections. [In:] 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. i in (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo Ochrony Środowiska (Dz. U. 2001 Nr 62 poz. 627 z późn. zm., Dz. U. 2008 r. Nr 25 poz. 150)
- Xue H., Feingold G., Stevens B., 2008, Aerosol Effects on Clouds, Precipitation, and the Organization of Shallow Cumulus Convection, *J. Atmos. Sci.*, 65, 392-406



## **CZEŚĆ I.**

# **NOWOCZESNE METODY DETEKCJI I PROGNOZOWANIA ZAGROŻEŃ METEOROLOGICZNYCH**



# **Możliwości i znaczenie produktów generowanych przez systemy teledetekcji naziemnej w zakresie interpretacji aktualnego stanu atmosfery**

*Irena Tuszyńska, Zdzisław Dziewit, Paweł Rychlewski,  
Jan Szturc, Anna Jurczyk, Katarzyna Ośródk, Wojciech Gajda,  
Rafał Lewandowski*

## **1. Wprowadzenie**

Dokonując pomiaru stanu atmosfery zmierzamy do pozyskania informacji pozwalającej na interpretację zjawisk w niej zachodzących. Dla oceny wpływu zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo, staramy się te zjawiska zrozumieć, wyjaśnić przyczyny ich powstawania, a pozyskaną wiedzę wykorzystać do ich automatycznej identyfikacji.

Dzięki sieci radarów meteorologicznych POLRAD i sieci stacji do rejestracji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych PERUN możemy z dużą dokładnością czasową i przestrzenną monitorować stan atmosfery, nieraz w całym obszarze rozciągłości poziomej i pionowej struktur meteorologicznych. Pozyskane informacje pochodzą z pomiarów teledetekcyjnych, które dalece odbiegają od tych pozyskiwanych w meteorologii klasycznej i nie zawsze mogą być dokładne i jednoznaczne, co wynika z faktu, iż informacja ta jest interpretacją sygnału zwrotnego od obiektów meteorologicznych. Analizując pozyskane dane musimy uwzględnić wiele czynników wpływających na ich jakość i wiarygodność.

Duża liczba produktów, jakie można wygenerować z pomiarów teledetekcyjnych oraz obszerność wiedzy specjalistycznej niezbędnej do ich zinterpretowania, zrodziły konieczność automatyzacji tych procesów. Dokładna analiza parametrów produktów standardowo generowanych oraz możliwych do wytworzenia w omawianych systemach zmierzała do opracowania metodyki zalgorytmizowania procesów generowania komunikatów/ostrzeżeń informujących o pojawieniu się groźnych zdarzeń meteorologicznych w zasięgu pomiaru wymienionych systemów.

Niniejsze opracowanie prezentuje wybrane możliwości systemów teledetekcji, eksploatowanych w Ośrodku Teledetekcji Naziemnej IMGW-PIB, odnośnie do

generowania produktów standardowych i niestandardowych (możliwych do wygenerowania) oraz w zakresie interpretacji sygnału radarowego na podstawie wybranego produktu i zdarzenia meteorologicznego.

## 2. Pomiary z systemów teledetekcji naziemnej jako źródło informacji o bieżącym stanie atmosfery

Do pomiaru stanu atmosfery IMGW-PIB wykorzystuje następujące teledetekcyjne sieci pomiarowe:

- POLRAD – sieć radarów meteorologicznych [Moszkowicz, Tuszyńska 2003; Tuszyńska 2005],
- PERUN – sieć czujników do pomiaru wyładowań atmosferycznych [Bodzak 2007].

Pozyskane przez nie dane cechują się różną rozdzielczością przestrzenną i czasową oraz dostępnością. Mierzone są różne parametry meteorologiczne (tab. 1).

Dane z systemów POLRAD i PERUN służą jednocześnie jako dane wejściowe do bardziej zaawansowanych systemów, np. tych, których zadaniem jest nowcasting. W IMGW-PIB systemem takim jest m.in. NIMROD (tab. 2) [Harrisom 1994a,b]. Głównym jego przeznaczeniem są zastosowania hydrologiczne zmierzające do optymalnego oszacowania natężenia opadu i nowcasting pola opadu na powierzchni ziemi [Harrisom 1994; Golding 1998; Moszkowicz, Tuszyńska 2003]. System NIMROD jest więc częścią systemu analizy danych radarowych, a jego produkty mogą być wykorzystywane do generowania ostrzeżeń związanych z: intensywnością, sumą i typem opadu, jako element zasilający tworzony system ekspercki.

Tab. 1 Podstawowe parametry danych generowanych przez systemy teledetekcyjne OTN

System pomiarowy	POLRAD	PERUN
Mierzone pola meteorologiczne	- Odbiciowość radarowa (przeliczana na natężenie opadu) - Rozkład prędkości radialnych. - Rozkład szerokości widma prędkości radialnych - Typ opadu (tylko dla radarów z podwójną polaryzacją)	Rozkład wyładowań
Rozdzielczość czasowa [min]	10	1
Rozdzielczość przestrzenna [km]	1x1 – dla produktów opadowych 0,5x0,5 – dla produktów dopplerowskich	Dane punktowe

Tab. 2. Podstawowe parametry danych generowanych przez system NIMROD (analizy i prognozy)

System przetwarzania	Analizy	Prognozy
Generowane pola meteorologiczne	- Natężenie opadu - Suma opadu - Typ opadu	- Natężenie opadu - Suma opadu - Typ opadu
Rozdzielczość czasowa [min]	- Natężenie i suma opadu: 10 - Typ opadu: 60	- Natężenie i suma opadu: krok 15-minutowy (generowane co 30 min) - Typ opadu: krok 60-minutowy (generowane co 60 min)
Rozdzielczość przestrzenna [km]	- Natężenie i suma opadu: 1 - Typ opadu: 8	- Natężenie i suma opadu: 4 - Typ opadu: 8
Czas wyprzedzenia prognoz [godz.]	0	6

Analizując produkty wygenerowane na podstawie danych z systemów teledetekcyjnych możemy dość skutecznie określić zjawiska towarzyszące zlokalizowanemu obiektom meteorologicznym. Często wymaga to jednak dużego doświadczenia w pracy operacyjnej ze wspomnianymi danymi. Ponadto, ze względu na trudności interpretacyjne i trudne do oszacowania błędy pomiaru [Szturc et al. 2007], należy mieć na uwadze związane z nimi ograniczenia oraz ich niepewność. Jednocześnie jednym z największych atutów jest natychmiastowa dostępność informacji. Dlatego zautomatyzowane przetwarzanie w poprawnie zinterpretowaną informację meteorologiczną jest bardzo istotne dla potencjalnego użytkownika, zwłaszcza w kontekście reagowania na zjawiska ekstremalne, których generalna intensyfikacja wiązana jest ze zmiennością klimatu.

### 3. Standardowe i niestandardowe produkty z systemów teledetekcji naziemnej – ich rola i znaczenie dla społeczeństwa i środowiska

#### 3.1. Produkty radarowe

Wynikiem przetworzenia zebranych danych pierwotnych z każdego cyklu pomiarowego (typu 3D zapisanych w układzie współrzędnych sferycznych) są produkty radarowe w układzie kartezjańskim (typu 2D). Wszystkie projekcje (z 3-wymiarowego układu sferycznego do 2-wymiarowego układu kartezjańskiego) są poprawiane na krzywiznę Ziemi. Praktycznie wszystkie produkty mogą być generowane na różnych poziomach nad średnim poziomem morza lub powierzchnią terenu [Instruction ... 2007, Products & Algorithms].

PRODUKTY RADAROWE GENEROWANE I MOŻLIWE DO WYGENEROWANIA PRZEZ SYSTEM POLRAD

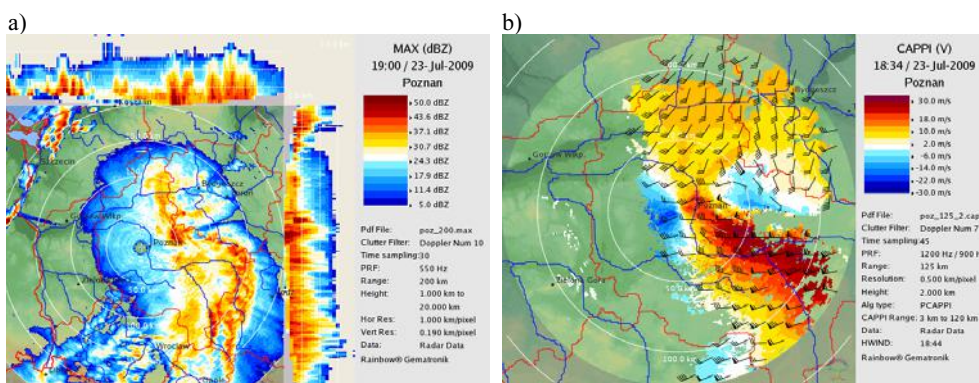
Nazwa produktu angielska/polska	Typ skanu	Typ danych		Definicja produktów pozyskiwanych i możliwych do pozyskania z określonych skanu
		WE	WY	
<b>Produkty radarowe: standardowe, hydrologiczne i wiatrowe (Standard, Hydrological and Wind Products)</b>				
PPI(dBZ) PPI(V) PPI(W) <i>Plan Position Indicator</i> Przekrój stożkowy	K D	dBZ V W	dBZ V W	Odwzorowanie rozkładu: - odbiciowości radarowej, - prędkości radialnych, - szerokości widma prędkości radialnych dla zlokalizowanej struktury meteorologicznej, pozyskane z jednego obrotu anteny.
PCAPPI(dBZ) PCAPPI(V) PCAPPI(W) <i>Pseudo Constant Altitude PPI</i> Przekrój poziomy	K D	dBZ V W	dBZ V W	Odwzorowanie rozkładu: - odbiciowości radarowej, - prędkości radialnych (rys. 2b), - szerokości widma prędkości radialnych w zlokalizowanej strukturze meteorologicznej, wyliczone dla określonej wysokości n.p.m.
MAX(dBZ) MAX(V) MAX(W) <i>Maximum Display</i> Maksymalne wartości z pomiaru radarowego	K D	dBZ V W	dBZ V W	Maksymalne wartości: - odbiciowości radarowej (produkt podstawowy) (rys. 2a), - prędkości radialnych, - szerokości widma prędkości radialnych pochodzące z obszaru zlokalizowanej struktury meteorologicznej, zobrazowane w postaci rzutu na trzy płaszczyzny.

Nazwa produktu angielska/polska	Typ skanu	Typ danych		Definicja produktów pozyskiwanych i możliwych do pozyskania z określonych skanu
		WE	WY	
CMAX(dBZ) CMAX(V) CMAX(W) <i>Maximum Display</i> Maksymalne wartości z pomiaru radarowego	K D	dBZ V W	dBZ V W	Obraz maksymalnych wartości: - odbiciowości radarowej, - prędkości radialnych - szerokości widma prędkości radialnych w rzucie tylko na płaszczyznę poziomą.
EHT(hight): - <i>Echo Top</i> - <i>Height of Max Reflectivity</i> - <i>Layer Thickness</i> - <i>Echo Base</i> Wysokości echa radarowego	K	dBZ	wyso- kość / gru- bość	Obraz wysokości: - wierzchołków echa radarowych, - maksymalnej odbiciowości, - warstwy echa (rozciągłości w pionie), - podstawy echa radarowego w obrębie zlokalizowanej struktury meteorologicznej, wyrażone w km.
RHI(dBZ) RHI(V) RHI(W) <i>Range Height Indicator</i> Przekrój pionowy na zadanym azymucie	E	dBZ V W	dBZ V W	Przekrój pionowy z rozkładu: - odbiciowości radarowej, - prędkości radialnych, - szerokości widma prędkości radialnych na zadanym azymucie.
SRI (dBR) <i>Surface Rainfall Intensity</i> Natężenie opadu	K	dBZ	dBR	Obraz rozkładu natężenia opadu w [mm/h] na zdefiniowanej przez użytkownika wysokości nad powierzchnią gruntu.
PAC(dBA) <i>Precipitation Accumulation</i> Suma opadów za określony przedział czasowy: 1, 3, 4, ..., 24 h	Produkt SRI		dBA	Produkt PAC jest zsumowanym natężeniem opadu w zdefiniowanym okresie, podany w mm. Najczęściej generowana jest godzinna suma opadu odświeżana co 10 minut.
VIL(dBA) <i>Vertically Integrated Liquid Water</i> Wodność scałkowana w pionie	K	dBZ	dBA	Chwilowa, oszacowana zawartość wody w zdefiniowanej przez użytkownika warstwie atmosfery, wyrażona w jednostkach sum opadu (mm).
VVP(V) <i>Volum Velocity Processing</i> Profil pionowy wiatru	D	V	inne	Obraz rozkładu wektorów wiatru wyliczonych do określonej wysokości nad stacją radarową. Prędkość i kierunek wiatru są liczone dla jednakowo odległych poziomów wysokości: przybliżony profil pionowy wiatru dla momentu obserwacji.
HWIND <i>Horizontal Wind Technique</i> Wiatr poziomy na określonej wysokości	D	V	inne	Rozkład wiatru poziomego na określonej wysokości: jego kierunek oraz prędkość. Pole wiatru poziomego na produkcie jest wyświetlane jako obraz poziomych wektorów wiatru na stałej wysokości w punktach regularnej siatki (rys. 2b).
VAD <i>Velocity Azimuth Display</i> Prędkość wiatru radialnego w funkcji azymutu	D	V	V	Średnia prędkość radialna w funkcji kąta azymutu, dla ustalonego kąta elewacji w zakresie określonego przedziału odległości ustalonego wzdłuż wiązki radarowej.
SHEAR: - <i>Radial Shear</i> - <i>Azimuthal Shear</i> - <i>Elevation Shear</i> Uskoki	D	V	inne	Obraz wartości: - składowych radialnych gradientu obliczanych z prędkości radialnej, na określonej powierzchni elewacji PPI, - gradientu obliczanego z prędkości radialnej w kierunku zmiany azymutu w trakcie obrotu anteny, - gradientu obliczanego z prędkości radialnej dla dwóch kolejnych elewacji.
VSHEAR <i>Vertical Shear</i> Pionowy uskoki wiatru	D	V	inne	Obraz zmiany radialnej prędkości wiatru pomiędzy dwoma ściśle określonymi warstwami atmosfery (m/s/km)
HSHEAR <i>Horizontal Shear</i> Poziomy uskoki wiatru	D	V	inne	Obraz zmiany prędkości radialnej na płaszczyźnie poziomej w zlokalizowanej strukturze meteorologicznej, na zadanej wysokości uwzględniającej krzywiznę ziemi (m/s/km)
LTB <i>Layer Turbulence</i> Turbulencje	D	W	W	Obraz wskaźnika turbulencji pomiędzy dwoma określonymi warstwami atmosfery (m/s).



Nazwa produktu angielska/polska	Typ skanu	Typ danych		Definicja produktów pozyskiwanych i możliwych do pozyskania z określonych skanu
		WE	WY	
Produkty prognoz i groźnych zjawisk (Forecasting & Phenomena Detection Products)				
SWI <i>Severe Weather Indicator</i> Wskaźnik groźnych zjawisk	D	dBZ V W	inne	Produkt analityczny; analizie są poddawane trójwymiarowe dane radarowe skanowania dopplerowskiego. Produkt wyznacza: <ul style="list-style-type: none"> <li>• obszary intensywnych opadów i rdzeni struktur burzowych,</li> <li>• obszary, gdzie możliwe jest zlokalizowanie mezocyklonów i mezoantycyklonów,</li> <li>• obszary dywergencji i konwergencji,</li> <li>• obszary zjawisk typu microburst.</li> </ul> Zobrazowane na produkcie w postaci specjalnych znaczników (ikon).
ZHAIL <i>Hail Detection</i> Prawdopodobieństwo wystąpienia gradu	K	dBZ	inne	Określa procentowe prawdopodobieństwo wystąpienia gradu na danym obszarze, bazując na danych o odbiciowości (pozyskanych z radarów pojedynczej polaryzacji fali) i wysokości izotermi zero stopni.
RTR <i>Rain Tracking</i> Śledzenie pól opadowych	Produkty: PPI(Z) CAPPI(Z) SRI		dBZ	Jest wynikiem analiz danych o odbiciowości i prędkości radialnej. Automatycznie śledzi i prognozuje pola opadu zlokalizowanych struktur meteorologicznych.
CTR <i>Cell Centroid Tracking</i> Śledzenie komórek burzowych	Produkty: PPI(Z) CAPPI(Z) MAX(Z) LMR VIL SRI		inne	Identyfikuje w zlokalizowanej strukturze meteorologicznej komórki burzowe, śledzi je i prognozuje kierunek ich przemieszczania się. Procesy te są zobrazowane na produkcie w postaci naniesionych konturów komórek: starych, aktualnych i prognozowanych.
WRN <i>Feature Detection &amp; Warning</i> Ostrzeżenia	Produkty ze skanu K		inne	Wizualizacja obszarów krytycznych potencjalnie zagrożonych wystąpieniem meteorologicznych zdarzeń ekstremalnych.
	Produkty ze skanu D		inne	

Objaśnienia: **D** – skan dopplerowski, **K** – skan klasyczny, **Z** – odbiciowość w skali logarytmicznej wyrażona w dBZ, **V** – prędkość radialna wyrażona w m/s, **W** – szerokość widma prędkości radialnych wyrażana w m/s



Rys. 2. Przykładowe produkty: a) MAX(dBZ), b) CAPPI(V) połączony z HWIND(V)

Wszystkie produkty są dostępne dla pojedynczego radaru, a część z nich jest składana w mapy zbiorcze dla obszaru całej Polski lub wybranego regionu.

Produkty z rozkładu: prędkości radialnych (V) i szerokości widma prędkości radialnych (W) mogą być tworzone tylko do odległości od radaru równej zasięgowi skanowania dopplerowskiego (maksymalnie do 125 km).

### 3.2. Produkty systemu NIMROD

Przetwarzanie danych radarowych w ramach systemu NIMROD obejmuje:

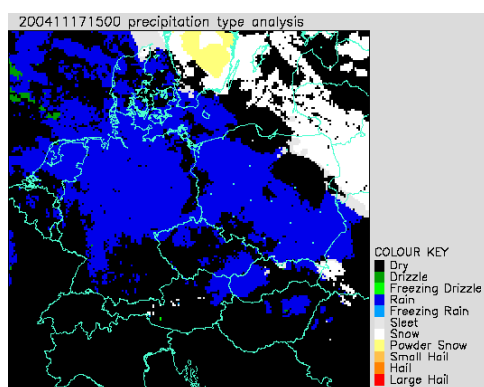
- rozpoznawanie i usuwanie ech pasożytniczych (nie opadowych) poprzez:
  - identyfikację i usuwanie pojedynczych 1-km gridów, gdzie średnie natężenie opadu przekracza maksymalne wartości dla obiektów meteorologicznych,
  - identyfikację i wypełnienie średnimi wartościami opadu gridów zawierających echa stałe,
  - zastosowanie schematu bayesowskiego do usuwania ech anomalnej propagacji;
- korektę na pionowy profil odbiciowości VPR w celu oszacowania natężenia opadu na powierzchni Ziemi i poprawienia błędów wynikających z:
  - redukcji mocy sygnału wraz z odległością ( $1/r^2$ ),
  - redukcji mocy sygnału na skutek przesłaniania wiązki radarowej,
  - tłumienia w opadach,
  - typu opadu, szczególnie z efektu „jasnego pasma” związanego ze strefą topnienia śniegu,
  - wzrostu opadów zachodzącego poniżej wysokości najniższego skanu PPI;
- zastosowanie deszczomierzy do wyrównania (adjustacji) danych radarowych za pomocą poprawki na obciążenie systematyczne (*Mean Field Bias*), tak aby średnie natężenia opadu na powierzchni Ziemi z radaru i deszczomierzy były zgodne.

#### PRODUKTY KOŃCOWE SYSTEMU NIMROD

Nazwa produktu	Definicja produktu	Wykorzystanie/źródło danych
Poprawione Natężenie Opadu z Pojedynczego Radaru	Oszacowanie chwilowego natężenia opadu na powierzchnię Ziemi w zasięgu radaru.	Używany do generowania produktów: Mapa Zbiorcza Natężenia Opadu oraz Końcowa Diagnoza Opadu.
Mapa Zbiorcza Natężenia Opadu	Mapa zbiorcza tworzona z produktów Poprawione Natężenie Opadu z Pojedynczego Radaru wygenerowanych przez radary sieci POLRAD w określonym Czasie Ważności Produktu.	Używana do generowania produktów: Końcowa Diagnoza Opadu i Miesięczna Suma Opadu. Mapa zbiorcza jest osadzona w obrębie domeny polskiej wersji Nimrod-a.
Końcowa Diagnoza Opadu	Natężenie opadu na powierzchni Ziemi w zasięgu całej domeny polskiej wersji NIMROD-a.	Powstaje z połączenia produktu Mapa Zbiorcza Natężenia Opadu, pola natężenia opadu otrzymanego z danych satelitarnych, danych ze stacji meteorologicznych oraz z produktu Kombinowana Prognoza Natężenia Opadu.
Kombinowana Prognoza Natężenia Opadu	Połączenie ekstrapolacyjnej prognozy natężenia opadu opartej na produkcie Końcowa Diagnoza Opadu oraz prognozowanego natężenia opadu na powierzchni Ziemi z mezoskalowego modelu numerycznego	Produkt ten jest połączeniem ekstrapolacyjnej prognozy natężenia opadu opartej na produkcie Końcowa Diagnoza Opadu oraz prognozowanym natężeniem opadu na powierzchni ziemi z modelu numerycznego NWP (model DWD Local Modell - LM).
Kombinowana Prognoza Sumy Opadu	Prognoza sumy opadu na powierzchni Ziemi z rozdzielczością czasową 15 minut i czasem wyprzedzenia do 6 godzin.	Produkt ten jest połączeniem prognozowanej sumy opadu otrzymanej z ekstrapolacyjnej prognozy natężenia opadu i prognozowanej sumy opadu na powierzchni ziemi z modelu numerycznego NWP.
Ostrzeżenie o Intensywnych Opadach	Tekst zawierający: czas wygenerowania ostrzeżenia, nazwa zlewni/jej kod, opis kryterium, które spowodowało wygenerowanie ostrzeżenia, czas kiedy przekroczenie kryterium nastąpiło lub kiedy nastąpi.	Generowane są biorąc pod uwagę przekroczenie kryteriów (wartości progowych) zdefiniowanych przez użytkownika dla obserwowanego i/lub prognozowanego natężenia opadu i/lub sumy opadu.

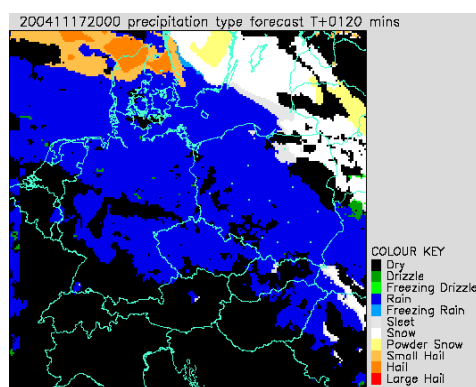
Z bieżących produktów Końcowa Diagnoza Opadu, Kombinowana Prognoza Natężenia Opadu oraz z różnych mezoskalowych pól diagnostycznych NWP otrzymanych z ostatniego uruchomienia modelu COSMO są wyznaczane mapy typu opadu: Diagnoza (rys. 3) i Prognoza Typu Opadu (rys. 4), które są polami wartości chwilowych z Czasem Ważności Produktu identycznym jak w produktach Końcowa Diagnoza Opadu i Kombinowana Prognoza Natężenia Opadu.

We wstępnej klasyfikacji kategoria opadów konwekcyjnych jest odróżniana od opadów niekonwekcyjnych z wykorzystaniem prognozy wysokości podstaw i wierzchołków chmur konwekcyjnych oraz rozkładu temperatury na różnych wysokościach z modelu COSMO.



Rys. 3. Diagnoza typu opadu

Generowane z rozdzielczością czasową 1 godz., na wyprzedzenie do 6 godzin. Rozpoznawane są następujące typy opadu: drobny grad, grad, duży grad, mżawka, marznąca mżawka, deszcz, deszcz ze śniegiem, marznący deszcz, śnieg i suchy śnieg.



Rys. 4. Prognoza z wyprzedzeniem do 3 godzin

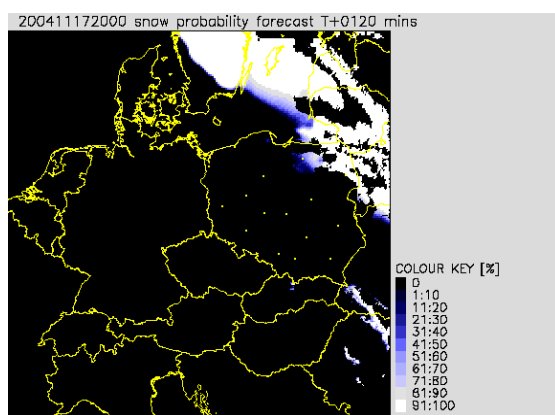
Tab. 3. Klasyfikacja typu opadu w systemie NIMROD

Kategoria opadu	Typ opadu	Opis algorytmu
Konwekcyjne $W_{max} > 5 \text{ m/s}$ $CTT \leq -15^\circ\text{C}$ $CBT \geq -5^\circ\text{C}$	Deszcz	$\int +T_w \geq 5.000^\circ\text{C}\cdot\text{m}$
	Drobny grad	$\int +T_w < 5.000^\circ\text{C}\cdot\text{m}$
	Grad	$W_{max} > 10 \text{ m/s}$
	Duży grad	$W_{max} > 20 \text{ m/s}$
Niekonwekcyjne $IRR < 0,25 \text{ mm/godz.}$ $CTT \geq -1^\circ\text{C}$	Mżawka	$T_{wsurf} > 0^\circ\text{C}$
	Marznąca mżawka	$T_{wsurf} \leq 0^\circ\text{C}$
Niekonwekcyjne $CTT < -1^\circ\text{C}$ $IRR \geq 0,25 \text{ mm/godz.}$	Deszcz	$P_{snow} < 10\%$
	Deszcz ze śniegiem	$10\% \leq P_{snow} \leq 60\%$
	Marznący deszcz	$10\% \leq P_{snow} \leq 60\%$ , $T_{wsurf} \leq 0^\circ\text{C}$
	Śnieg	$P_{snow} > 60\%$
	Suchy śnieg	$T_{wsurf} < -3^\circ\text{C}$

$\int +T_w$  – scałkowane po wysokości dodatnie wartości  $T_w$ ;  
 $W_{max}$  – maksymalna prędkość pionowa w chmurach konwekcyjnych,  
 $T_{wsurf}$  – temperatura termometru zwilżonego na powierzchni Ziemi,  
 $P_{snow}$  – prawdopodobieństwo wystąpienia śniegu,  
 $CTT$  – temperatura wierzchołków chmur,  
 $CBT$  – temperatura podstaw chmur,  
 $IRR$  – chwilowe natężenie opadu.

W kategorii opadów konwekcyjnych rozróżniane są opady: deszczu, gradu i śniegu (tab. 3) na podstawie scałkowanej po wysokości dodatniej temperatury termometru zwilżonego oraz szacunkowej, wyznaczonej przez autorów systemu maksymalnej prędkości pionowej ( $w_{max}$ ) obliczonej ze scałkowanej po wysokości CAPE (stosując metodę wznoszenia cząstki z mieszaniem) lub z natężenia opadu.

Dla opadów typu śnieg jest generowana Diagnoza i Prognoza Prawdopodobieństwa Wystąpienia Śniegu (rys. 5) i Udziału Śniegu z rozdzielczością czasową 1-godz. Prawdopodobieństwo wystąpienia śniegu  $P_{snow}$  (rys. 5) oznacza, że dominującym opadem na powierzchnię Ziemi jest śnieg. Oblicza się je wyłącznie w tych obszarach, gdzie opady są diagnozowane lub prognozowane. Produkty Udział Śniegu i Prawdopodobieństwo Wystąpienia Śniegu są powiązane. W tym przypadku  $P_{snow}$  jest obliczany w całym zasięgu domeny NIMROD-a niezależnie od tego, czy opad był analizowany czy prognozowany.



Rys. 5. Prognoza prawdopodobieństwa wystąpienia śniegu z wyprzedzeniem 2 godzin

W trakcie pracy operacyjnej systemu NIMROD są jednocześnie generowane tzw. produkty pośrednie. Należą do nich:

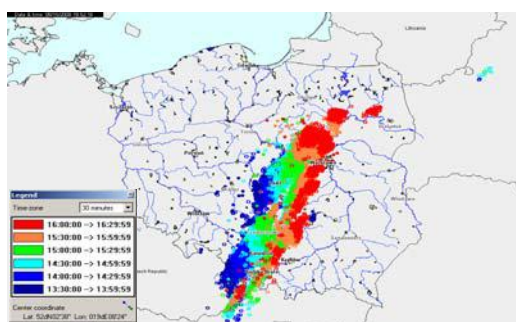
- skalibrowane dane satelitarne IR oraz VIS,
- miesięczna klimatologia z danych Meteosat,
- diagnoza wysokości wierzchołków chmur na podstawie danych Meteosat,
- prawdopodobieństwo opadu (PoP) na podstawie danych Meteosat,
- pole natężenia opadu na podstawie danych Meteosat,
- miesięczna i roczna klimatologia częstotliwości wykrywania (FoD) superrefrakcji,
- identyfikacja obiektów opadowych oraz ich ruchu w ciągu ostatniej godziny, które mogą być wykorzystane do diagnozowania bieżącego stanu atmosfery lub prac badawczych prowadzonych w zakresie interpretacji zjawisk ekstremalnych.

### 3.3. Produkty systemu detekcji i lokalizacji wyładowań burzowych

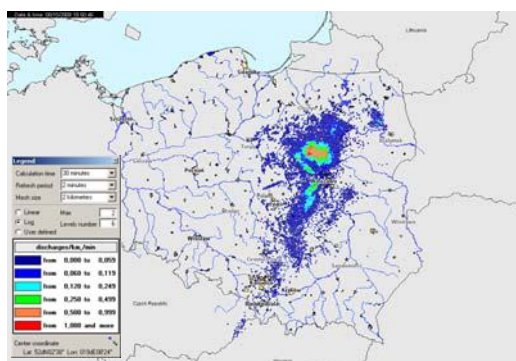
W trybie on-line, za pomocą oprogramowania PDM (*Processing and Display Module*), możliwa jest prezentacja w postaci mapy jednego z trzech produktów:

aktywności elektrycznej w atmosferze (wyładowania doziemne i chmurowe, rys. 6), śledzenia komórek burzowych i gęstości wyładowań (rys. 7).

Możliwość przetwarzania zgromadzonych danych za pomocą dedykowanego oprogramowania pozwala na dokładniejszą analizę zaistniałej w przeszłości sytuac-



Rys. 6. Mapa lokalizacji wyładowań  
Lokalizacje są dzielone na dwie kategorie: IC (*intra-cloud*, chmurowe) i CG (*cloud-to-ground*, doziemne).  
IC są definiowane przez ich pozycję (długość i szerokość geograficzna) i czas wystąpienia (z dokładnością do 0,1 ms).  
CG są definiowane przez ich pozycję, czas wystąpienia oraz parametry elektryczne. Lokalizacje są grupowane w wyładowania



Rys. 7 Mapa gęstości wyładowań  
Liczba wyładowań na kilometr kwadratowy i minutę z dokładną informacją o intensywności burzy. Dzięki parametrom: *calculation time* – czas obliczania, *refresh period* – okres odświeżania i wielkość siatki, obliczenia mogą być adaptowane dla potrzeb określonego użytkownika lub aplikacji

PRODUKTY SYSTEMU DETEKЦИИ I LOKALIZACJI WYŁADOWAŃ BURZOWYCH PERUN

Nazwa	Opis	Format	Częstotliwość	Uwagi
<b>Produkty generowane w trybie on-line</b>				
Lokalizacje wyładowań	Lokalizacje zarejestrowanych wyładowań	gif	1 min	Możliwość zdefiniowania, jakie wyładowania mają być wyświetlane. Standardowo produkt zawiera lokalizacje wyładowań doziemnych
Gęstość wyładowań	Gęstość wyładowań	gif		
Śledzenie komórek burzowych	Śledzenie komórek burzowych	gif		System oblicza w czasie rzeczywistym zarówno kontury, jak i położenie rdzeni komórek
safir_ASCII	Informacje o wyładowaniach (szczegółowe parametry poszczególnych wyładowań)	txt	1 min	Plik tekstowy zawierający informacje o wyładowaniach. Do zobrazowania wymagane oprogramowanie np. RAPOK
safir_ASCII_WWW		txt	10 min	
<b>Produkty generowane w trybie off-line</b>				
Lokalizacje wyładowań	Lokalizacje zarejestrowanych wyładowań	gif		Produkt tworzony z danych archiwalnych na żądanie
Gęstość wyładowań	Gęstość wyładowań	gif		
Mapa izokeuranczna	Liczba dni burzowych w analizowanym okresie	gif		

cji burzowej. W przypadku zaawansowanej analizy możemy pozyskać produkty dodatkowe, tzw. produkty off-line. Są to m.in.:

- wizualizacja wybranego rodzaju wyładowań (doziemne, chmurowe, doziemne i chmurowe) dla wybranego okresu,
- wizualizacja gęstości wyładowań dla wybranego okresu,
- generowanie map izokeraunicznych (liczby dni burzowych).

Analiza taka jest bardzo przydatna do dokładnego określenia wyładowań zarówno dla celów badawczych jak i w postępowaniach wyjaśniających np. towarzystw ubezpieczeniowych, czy też w postępowaniach sądowych.

#### **4. Metodyka wykorzystania produktów z systemów teledetekcji naziemnej do automatycznego poszukiwania sygnatur zjawisk niebezpiecznych w atmosferze**

##### **4.1. Niestandardowe możliwości generowania produktów**

Eksploatowany w IMGW-PIB system radarowy jest systemem licencjonowanym, którego algorytmy i oprogramowanie opracowano i zrealizowano poza IMGW, co ogranicza możliwość wpływu na modelowanie procesów generowania produktów. Producent udostępnił jedynie różnicowanie produktów przez sposób ich generowania lub zmianę wartości progowych niektórych parametrów określonych w definicji produktu [Instruction ... 2007, Products & Algorithms].

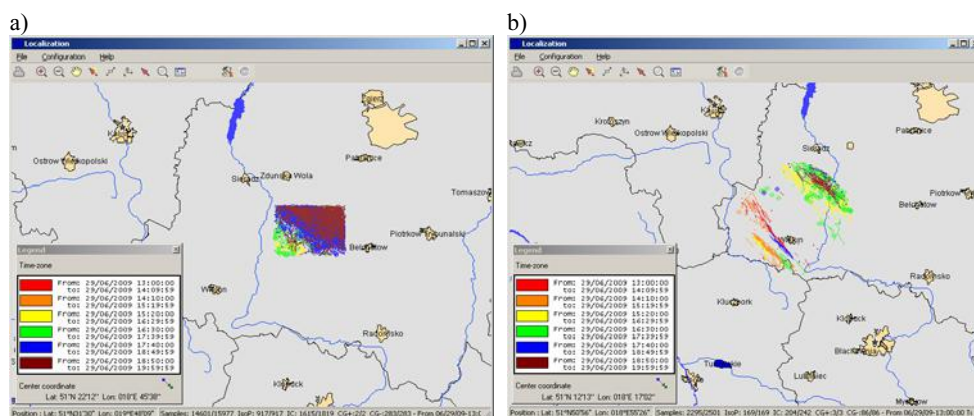
System radarowy umożliwia generowanie produktów już z wartości zebranych podczas jednego lub kilku obrotów anteny (przy ustalonym kącie elewacji), a niektóre wymagają całej sekwencji kątów (skanu). Najczęściej generowane produkty to te, które informują o stanie atmosfery najbliższej powierzchni Ziemi na ile to technicznie możliwe. Produkty te można nazwać podstawowymi (standardowymi). Są one generowane na bieżąco w radarowej służbie operacyjnej IMGW-PIB. Z danych pozyskanych w procesie pomiaru radarowego można wygenerować wiele produktów dodatkowych, wzbogacających informacje pochodzące z produktów podstawowych. Możliwe jest także tworzenie różnych produktów pośrednich standardowo niegenerowanych, a wnoszących dodatkowe informacje o różnych parametrach meteorologicznych atmosfery w danym momencie.

Analiza dostępnych algorytmów oraz wartości parametrów poszczególnych produktów radarowych, według których są definiowane, a następnie generowane, pozwoliła na dokładne zbadanie możliwości systemu w tym zakresie. Między innymi sformułowano ogólne kryteria tworzenia różnych produktów dodatkowych. Produkty te można wytwarzać biorąc po uwagę możliwości:

- wynikające z definicji samych produktów, tj.:
  - zobrazowanie stanu atmosfery na określonej wysokości, jak np.: PCAPPI, HWIND, HSHEAR,
  - zobrazowanie stanu atmosfery w określonej warstwie przez szacowanie wartości średnich (VSHEAR, LMR, LTB) lub maksymalnych, jak np. produkty typu MAX;



- zapewniane przez generator produktów na podstawie określonego algorytmu, lecz różnych danych wejściowych dowolnego skanu: klasycznego, dopplerowskiego lub elewacyjnego np.:
  - grupa produktów prezentująca maksymalne wartości: MAX(dBZ), MAX(V), MAX(W),
  - produkty z określonej wysokości: CAPPI(dBZ), CAPPI(V), CAPPI(W),
  - produkty wygenerowane z danych pozyskanych z jednego obrotu anteny: PPI(dBZ), PPI(V), PPI(W),
  - różnego rodzaju przekroje pionowe: RHI(dBZ), RHI(V), RHI(W) obrazujące odbiciowość radarową, rozkład prędkości radialnej czy szerokości widma prędkości radialnych;
- wynikające ze zmian wartości progowych poszczególnych parametrów produktu, co skutkuje pozyskaniem określonej informacji (o znaczeniu meteorologicznym) uzupełniającej informacji podstawowe;
- określonego typu algorytmu wyliczania produktu, lecz na podstawie różnych danych wejściowych, np.: LMR – odbiciowość średnia w danej warstwie (ze skanu klasycznego) i LTB – wskaźnik turbulencji w warstwie (ze skanu dopplerowskiego), które są traktowane jako niezależne (różne) produkty.



Rys. 8. Przykłady produktów systemu PERUN zawierające dane dla obszaru: a) prostokąta, b) pierścienia o promieniach 4 km (wewnętrzny) i 15 km (zewnętrzny)

System PERUN nie ma obecnie możliwości prezentowania czy też dostarczania danych o wyładowaniach z określonego obszaru. Udostępnianie danych polega na ich przesyłaniu w formacie graficznym lub tekstowym z całego obszaru działania systemu. Nie zawsze jest to wygodne i potrzebne końcowemu odbiorcy. Dlatego też powstała metoda tworzenia dodatkowych produktów dla dowolnie ograniczonych obszarów. Przyjęto w niej następujące założenia:

- aplikacja działa automatycznie w cyklu 10-minutowym,
- wszystkie działania są wykonywane na danych wyjściowych systemu PERUN (secondary),

- jest możliwe zdefiniowanie dowolnego kształtu obszaru filtrowania (prostokąt, koło, wielobok),
- jest możliwe zdefiniowanie zawartości danych wyjściowych (plik wyjściowy zawiera określone pola z plików wtórnych systemu),
- dystrybucja plików odbywa się za pośrednictwem protokołu FTP.

## 4.2. Przykładowa analiza modyfikacji parametrów wybranego produktu radarowego i zobrazowanie jej wyników

Możliwości systemu radarowego, jakie daje dokładna analiza definiowalnych parametrów poszczególnych produktów [Instruction ... 2007, Products & Algorithms], zaprezentowano na przykładzie produktu EHT (Echo Height) – wysokości echa radarowego.

### 4.2.1. Źródło danych do wygenerowania produktów typu EHT

Źródłem danych dla produktu EHT są dane zebrane w procesie skanowania klasycznego zapisane w układzie sferycznym.

Podstawowym typem danych wejściowych dla algorytmu generującego produkt EHT jest odbiciowość radarowa lub odbiciowość przeliczona na natężenie opadu wg zależności Marshalla-Palmera [Battan 1973].

Na podstawie analizy danych o odbiciowości wg algorytmu produktu EHT (wybierając kolejne opcje w polu *Data Storage*) (rys. 9) można wygenerować:

- wysokości wierzchołków echa radarowego –  $EHT_{EchoTop}$ ,

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">_200_etz.eht</p> <p><b>Echo Height</b> Unit: SI</p> <hr/> <p><b>Image</b></p> <p>Range: 250 km</p> <p>Size: 500 Pixel</p> <hr/> <p><b>Height</b></p> <p>Top: 20 km</p> <p>Bottom: 0.5 km</p> <hr/> <p><b>Threshold</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Reflectivity</p> <p>Minimum Reflectivity: 4</p> <p><input type="radio"/> Rainfallintensity</p> <p>Z-R Relation A: 200</p> <p>Z-R Relation B: 1.6</p> <p>Minimum R: 2 mm/h</p> <hr/> <p><b>Data Storage</b></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Echo Top</p> <p><input type="checkbox"/> Echo Base</p> <p><input type="checkbox"/> Height of Max. Reflectivity</p> <p><input type="checkbox"/> Layer Thickness</p> </div>	<p><b>I</b></p> <p>Image</p> <p><i>Range</i> – maksymalna odległość od radaru</p> <p><i>Size</i> – wielkość (rozmiar) obrazu w pikselach</p> <p><b>Height</b></p> <p><i>Top</i> – maksymalna wartość wysokości przyjęta do analiz danych</p> <p><i>Bottom</i> – dolna granica przyjęta do analiz</p> <p><b>Threshold</b> – określa względem jakich parametrów będzie liczona wysokość:</p> <p><i>Reflectivity</i> – algorytm wykorzystuje dane o odbiciowości w [dBZ]</p> <p><i>Minimum Reflectivity</i> – minimalna wartość progu odbiciowości</p> <p><i>Rainfall intensity</i> – natężenie opadu</p> <p>– wartości współczynników dla relacji Z-R</p> <p>– <i>Minimum R</i>: wartość opadu przyjęta do wyliczania produktu</p> <p><b>Data Storage</b> – wybór którejś z opcji tego pola decyduje o rodzaju wyliczanego produktu:</p> <p><i>Echo Top</i> – wysokości wierzchołków</p> <p><i>Echo Base</i> – wysokości podstawy echa</p> <p><i>Height of Max. Reflectivity</i> – wysokości maksymalnej odbiciowości</p> <p><i>Layer Thickness</i> – grubości zlokalizowanej struktury (rozciągłości w pionie w obrębie każdego zobrazowanego piksela)</p>
--	--

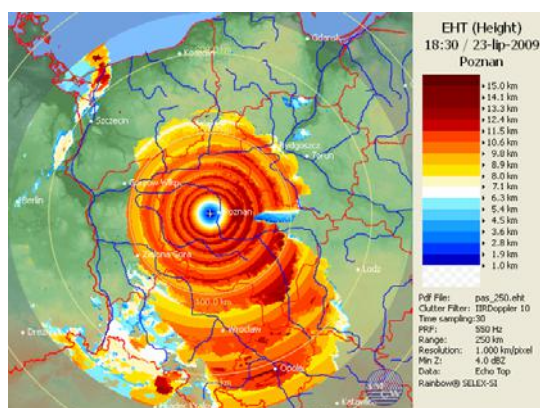
Rys. 9. Arkusz definicji produktu EHT z objaśnieniami



- wysokości echa radarowego dla maksymalnej wartości odbiciowości lub natężenia opadu –  $EHT_{HeightMaxZ}$  w danym punkcie,
- wysokości podstawy echa  $EHT_{EchoBase}$  (dla przestrzeni objętej pomiarem),
- grubość warstwy echa  $EHT_{Thicknes}$  (różnica między najwyższą a najniższą wysokością echa w danym punkcie pomiaru), co odpowiada obliczeniom: Echo Top minus Echo Base.

Tab. 4. Wartości parametrów dla operacyjnie (standardowo) wytwarzanych produktów typu EHT

Parametr	*.eht	
Range (km)	200	Standardowo wytwarzany produkt $EHT_{EchoTop}$ jest obrazem wysokości wierzchołków echa radarowego w zasięgu do 200 km od radaru, z rozdzielczością 1x1 km na punkt zobrazowania. W procesie generowania produktu są analizowane wszystkie miejsca, w których wykryto echa radarowe, a zobrazowane wartości pochodzą z największych wysokości, na których je zlokalizowano. Minimalna wartość odbiciowości (wartość progowa) uwzględniana w analizie to 4 dBZ dla każdej z kolumn pionowych o podstawie 1x1 km
Size (piksel)	400	
Top (km)	20	
Bottom (km)	0,5	
Min Reflectivity (dBZ)	4	
Rainfall intensity (dBZ)	–	
Data Storage	Echo Top	



Rys. 10. Obraz wysokości wierzchołków echa radarowego  $EHT_{EchoTop}$  produkt standardowy.

#### 4.2.2. Zobrazowanie analiz parametrów produktu EHT

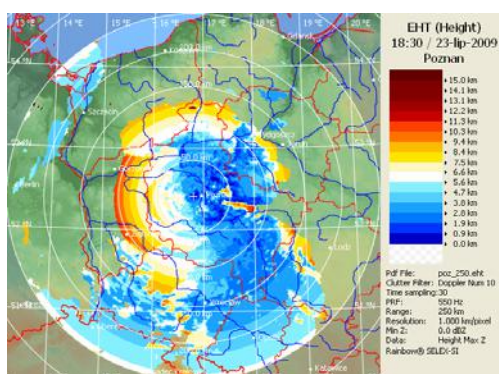
Wykorzystując możliwości, jakie dają definicja i zmiany wartości progowych poszczególnych parametrów, wygenerowano prezentowane na rys. 11-16 produkty dodatkowo możliwe do utworzenia w ramach produktu typu EHT.

Produkt  $EHT_{Height Max Z}$  (rys. 11) – obraz wysokości (wyrażonych w km), na których zlokalizowano największą wartość odbiciowości radarowej – jest uzupełnieniem informacji o rozkładzie odbiciowości w zlokalizowanym obiekcie meteorologicznym. Dla poszczególnych punktów mapy prezentuje on wysokości, dla których wyszukano największe wartości odbiciowości w kolumnach o podstawie 1x1 km do maksymalnej wysokości możliwego lub wykonywanego pomiaru; w prezentowanym przykładzie zdefiniowanego na 15 km.

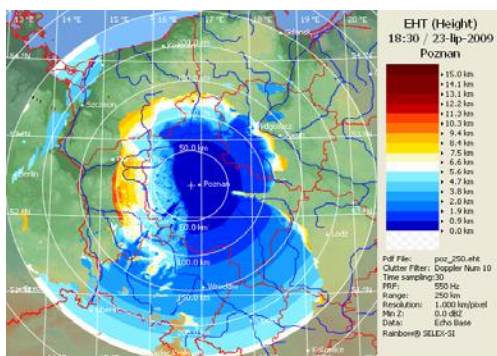
Tab. 5. Optymalne wartości parametrów dla produktu typu EHT i wartości użyte w procesie generowania prezentowanych produktów przykładowych typu EHT

Parametr	Optymalne wartości parametrów*	Wartości dla prezentowanych przykładów
Range (km)	200 - 250	250
Size (piksel)	400 - 500	500
Top (km)	10 - 20	15
Bottom (km)	0,0 - 1,00	0,5
Min Reflectivity (dBZ)	0 - 4	0, 10, 20, 30
Rainfall intensity (mm/h)	0,1 - 1	-
Data Storage	Echo Top, Height of Max. Reflectivity, Echo Base, Layer Thickness	Echo Top, Height of Max. Reflectivity, Echo Base, Layer Thickness

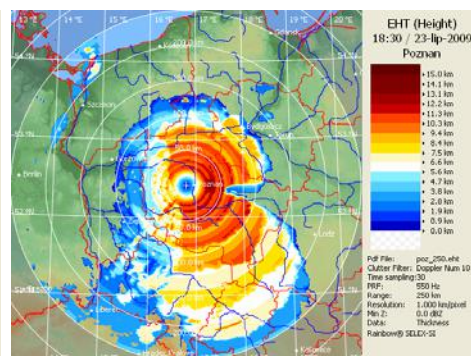
\* - dobierając wartości parametrów należy zwrócić uwagę na ich współzależności



Rys. 11. Zobrazowanie wysokości odbiciowości maksymalnej  $EHT_{Height Max Z}$



Rys. 12. Zobrazowanie podstaw ech radarowych  $EHT_{Echo Base}$  od wartości równej 0 km



Rys. 13. Rozciągłość w pionie (grubość warstwy) echa radarowego –  $EHT_{Thickness}$

Produkt  $EHT_{Echo Base}$  (rys. 12) może być wykorzystany tylko dla bardzo małych odległości od lokalizacji radaru, np. do 30-50 km. Krzywizna Ziemi i wartość pierwszego kąta podniesienia anteny (zawsze większa od zera) wpływają na niemożność pomiaru ech radarowych dla warstw przyziemnych, szczególnie w większych odległościach od radaru, co uniemożliwia określanie rzeczywistej wysokości

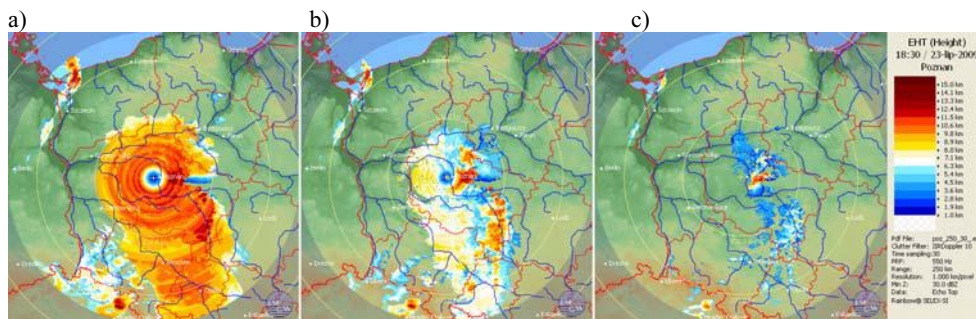
podstawy echa i posługiwanie się operacyjnie produktem typu *EHT<sub>Echo Base</sub>* w szerszym zakresie. Na załączonym przykładzie widać nienaturalne zwiększanie się wartości wysokości podstaw ech w dużych odległościach od radaru.

Produkt *EHT<sub>Thickness</sub>* (rys. 13) to teoretycznie atrakcyjne źródło danych jako informacja o stopniu rozwoju groźnych komórek burzowych. Jednak nie jest generowany operacyjnie. Problemem jest zbyt znacząca niejednorodność przestrzenna pozyskanych danych. Jest to wynikiem techniki pomiaru radarowego; część ech (przyziemnych) nie jest lokalizowana wskutek ograniczeń powodowanych dla odległości dalszych przez tzw. „horyzont radarowy”, a dla bliskich przez tzw. „strefę martwą” nad radarem. Ograniczenie parametrów wytwarzania do wartości gwarantujących jednorodność zawęża obszar monitorowany (mapa zbiorcza nie pokrywałaby terenu Polski). Produkt stanie się atrakcyjny po zagęszczeniu sieci POLRAD.

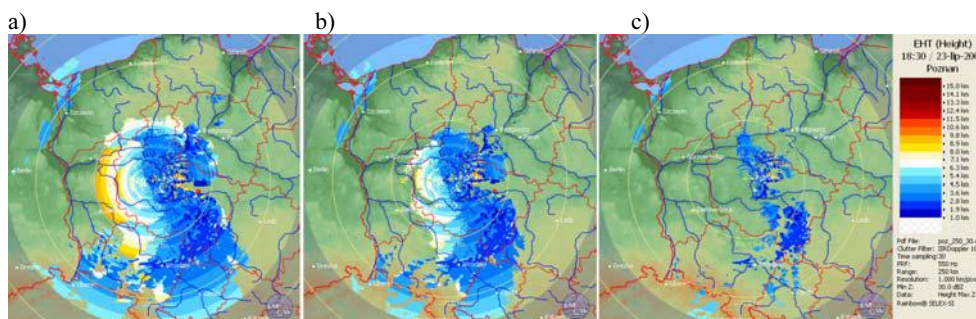
Wartości parametrów *Bottom* i *Top* wpływają na zasięg pionowy analiz danych radarowych. W okresie letnim struktury opadowe sięgają niejednokrotnie do wysokości 18 km, dlatego zalecane jest ustawienie parametru *Top* w zakresie 18-20 km. Natomiast parametr *Bottom* powinien przyjmować możliwie jak najmniejsze wartości. Pojawia się jednak trudność, gdyż dążymy do tego, aby definiowane produkty gwarantowały maksymalną jednorodność przestrzenną obserwacji. Wysokość wiązki radarowej nad poziomem Ziemi szybko wzrasta w dużych odległościach od radaru (np. 580 m przy odległości 50 km, 1,5 km przy 100 km, 2,6 km przy 150 km, 4,1 km przy 200 km). Ze względu na to konieczny jest kompromis między poziomym zasięgiem jednorodności produktu (mała wartość parametru *Bottom* = mały zasięg jednorodności) a znaczeniem zjawisk z najniższych warstw atmosfery, których nie weźmiemy pod uwagę (duża wartość parametru *Bottom* = gruba, dolna warstwa atmosfery tracona z pola widzenia). Przykładowo:

- dla *Bottom* = 0,5 km dane będą jednorodne tylko w promieniu ok. 50 km od radaru, a pozostała część produktu będzie "obciążona" niejednorodnością,
- dla *Bottom* = 4 km dane będą jednorodne w całym obszarze produktu, ale zjawiska typowe dla zimy w ogóle nie zostaną odwzorowane na mapie.

Od rozwoju pionowego struktur opadowych zależy też ustawienie prognozy odbiciowości (parametru *Minimum Reflectivity*). Dla okresu letniego może on przyjąć standardową wartość 4 dBZ. Natomiast dla pory roku, której towarzyszą opady stałe (szczególnie suchego śniegu), wartość ta może okazać się za duża. Wynika to z różnych wartości odbiciowości od poszczególnych typów hydrometeorów [Moszkowicz, Tuszyńska 2003]. Z wieloletnich obserwacji wynika, że np. dla pory zimowej, tj. dla opadów śniegu, wartość ta powinna być mniejsza (maksymalnie do 2 dBZ). Zbyt duża wartość może skutkować brakiem zobrazowania ech od słabych opadów zarówno w postaci stałej, jak i ciekłej. Natomiast latem, gdy w atmosferze oprócz hydrometeorów znacznie zwiększa się ilość obiektów niemeteorologicznych (zanieczyszczeń typu stałego lub biologicznego) pozostawienie wartości prognozy równego 4 dBZ może powodować pojawieniem się fałszywych "stref opadu". Do analiz wykonanych na potrzeby tej pracy uwzględniano dane już od 0 dBZ (mimo pojawiających się błędów pomiaru, których badacz jest w stanie zauważyć i uwzględnić).



Rys. 14. Obrazy wysokości wierzchołków struktury wygenerowane dla różnych wartości parametru *Minimum Reflectivity*: a) 10 dBZ, b) 20 dBZ, c) 30 dBZ



Rys. 15. Obrazy wysokości maksymalnych odbiciowości wygenerowane dla różnych wartości parametru *Minimum Reflectivity*: a) 10 dBZ, b) 20 dBZ, c) 30 dBZ

Prezentowane na rys. 14 i 15 przykładowe analizy danych radarowych w zależności od wartości progowej parametru *Minimum Reflectivity* mogą służyć do badań zależności między określoną wartością odbiciowości a wysokością jej występowania w obszarze zlokalizowanej struktury [Moszkowicz, Tuszyńska 2003, Boddzak 2005].

W przypadku generowania produktów typu EHT w oparciu o parametr *Rainfall Intensity* (rys. 9) pozyskujemy podobne analizy. Minimalna wartość, od której możemy rozpocząć generowanie produktów to 0,1 mm/h; taką wartość (jako minimalną) dopuszcza definicja produktu. Natomiast dla *Minimum Reflectivity* parametr ten może już przybierać dolne wartości progowe z zakresu przedziału wykrywalności ech radarowych.

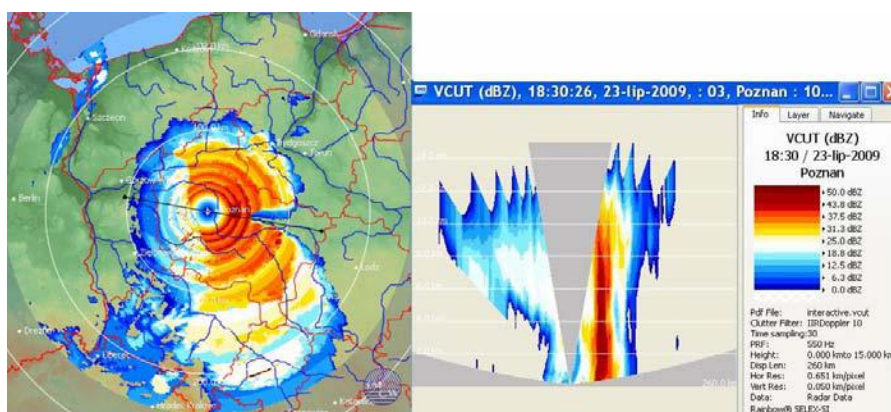
#### 4.2.3. Interpretacja map wygenerowanych wg algorytmu typu EHT

Analizując mapy EHT (rys. 11-15) można stwierdzić, że w zlokalizowanym obiekcie meteorologicznym największe odbiciowości występują w obszarach ech opadowych (sięgających powierzchni Ziemi w obszarze rdzenia struktury). Natomiast na obrzeżach zlokalizowanej struktury (od strony północno-zachodniej) największe wartości odbiciowości występują na większych wysokościach. Z załączonych map EHT<sub>Echo Top</sub>, EHT<sub>Echo Base</sub> i EHT<sub>Height MaxZ</sub> (rys. 11-13) wnioskować można, że w tych obszarach mamy do czynienia z wypiętrzoną strukturą cumulonimbus

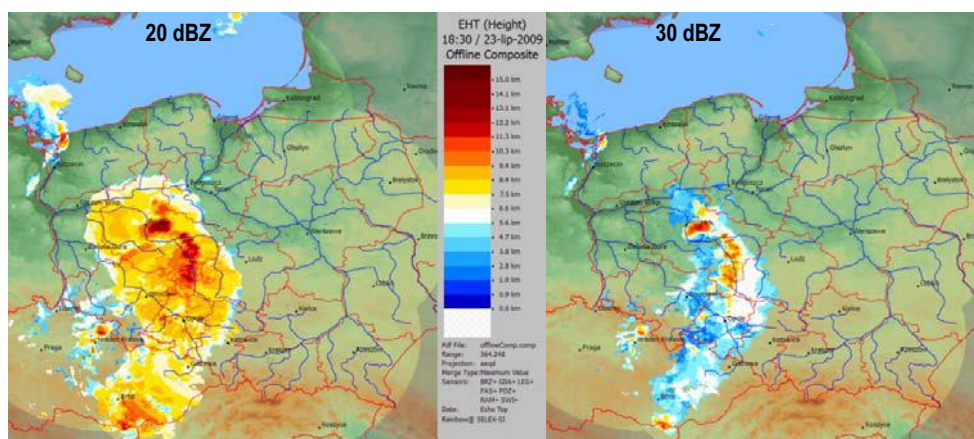


podobną do gatunku *cumulonimbus capillatus* (wierzchołek w kształcie kowadła) [Miętus 2001].

Na uwagę zasługuje obszar w pobliżu radaru od strony wschodniej, gdzie odbiciowość przekracza 30 dBZ. W obszarze tym widoczna jest wyraźnie odizolowana komórka, o znacznej rozciągłości pionowej (patrz produkt EHT<sub>Thickness</sub>), która powoduje wyłumienie (pochłonięcie) sygnału fali elektromagnetycznej. Efektem tego jest „przesłanianie” i niemożność zarejestrowania ech znajdujących się na tym kierunku, tzw. „wycinanie ech”. Potwierdza to przekrój pionowy (rys. 16) wykonany w obszarze zidentyfikowanej struktury.



Rys. 16. Przekrój pionowy diagnostujący zlokalizowaną strukturę wzdłuż kierunku zaznaczonego czarną kreską na produkcie EHT<sub>Thickness</sub> (z zachodu na wschód)



Rys. 17. Obrazy prezentujące mapy zbiorcze wysokości ech radarowych (z tego samego terminu) przy przyjęciu do analizy odbiciowości progowej 20 dBZ i 30 dBZ

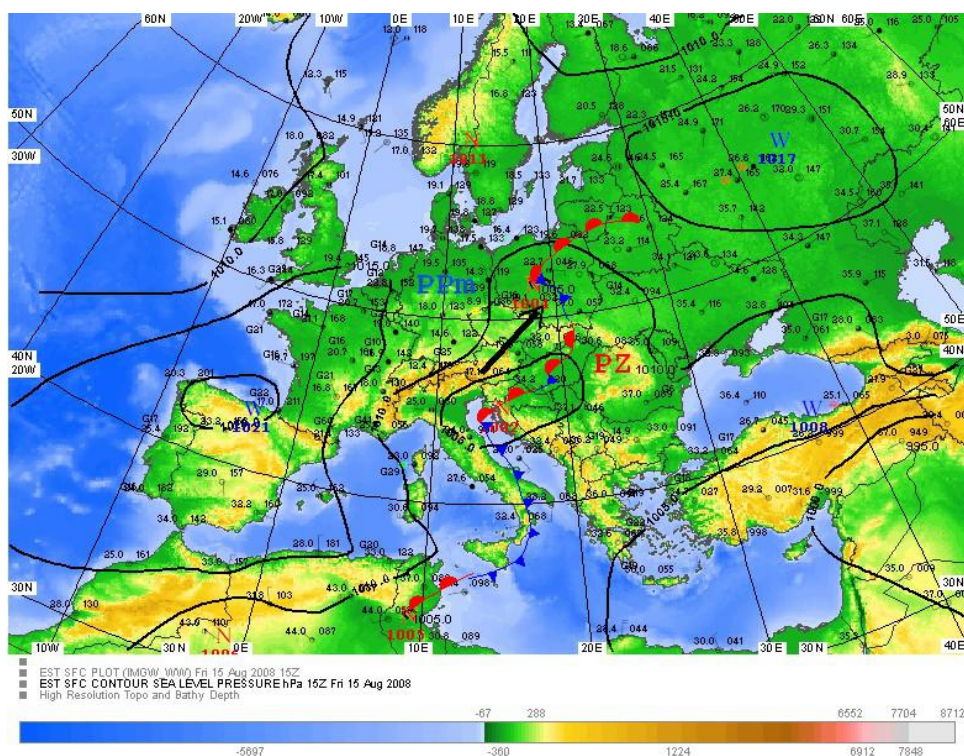
Mapy przedstawione na rys. 17 wygenerowano na podstawie produktów typu EHT ze wszystkich radarów, w których zasięgu zlokalizowano prezentowaną strukturę meteorologiczną. W obszarach, gdzie dane z 2 lub 3 radarów pokrywają się, łączono je wybierając maksymalne wartości (algorytm *Maximum Value*). Po-

dobne mapy będą wykorzystane w tworzonym systemie eksperckim jako źródło wstępnie wyselekcjonowanych danych do identyfikacji typu hydrometeorów lub zjawisk meteorologicznych.

### 4.3 Obraz sytuacji meteorologicznej na wybranych produktach systemu POLRAD i PERUN

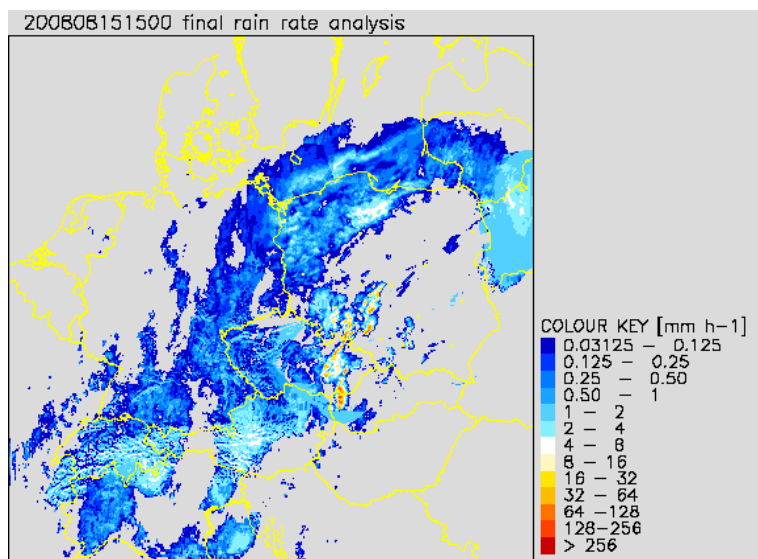
Wyselekcjonowane z bazy danych systemu radarowego przypadki określonych zjawisk/procesów analizowano pod kątem wartości parametrów przyjmowanych przez poszczególne produkty. Prowadzone prace miały ukazać możliwości systemów co do diagnozowania szczególnie niebezpiecznych zdarzeń meteorologicznych, których nasilenie jest związane z obserwowanymi zmianami klimatu, a których znaczenie dla bezpiecznego funkcjonowania nowoczesnego państwa i nowoczesnej gospodarki stale rośnie. Jednym z analizowanych przypadków była sytuacja z dnia 15 sierpnia 2008 roku, dla której wygenerowano bazę danych w zasięgu nowo opracowanej domeny dla radarowej mapy zbiorczej. Produkty z poszczególnych radarów generowano z danych pochodzących z maksymalnego zasięgu pomiaru (250 km od radaru) skanowania klasycznego.

Przemieszczając się nad obszarem Polski strukturoom meteorologicznym towarzyszyły w tym dniu groźne zjawiska atmosferyczne w postaci intensywnych

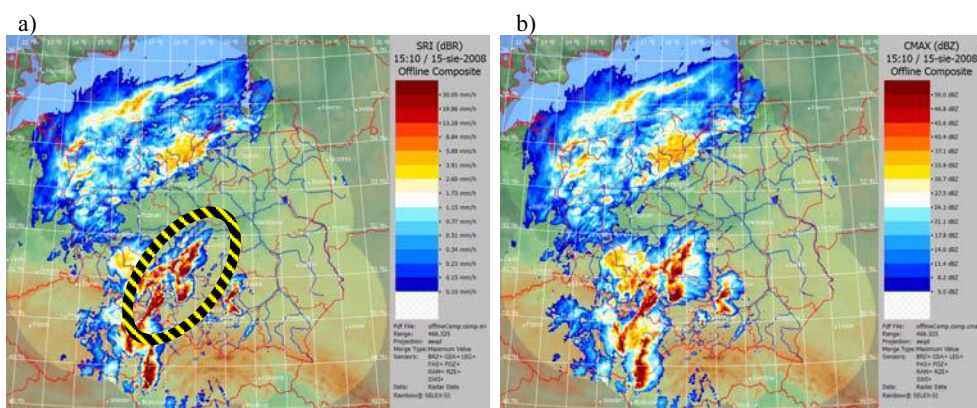


Rys. 18. Mapa synoptyczna dolna, 15.08.2008 godz. 15 UTC. Strzałką zaznaczono obszar zafalowanego frontu atmosferycznego nad Polską, w którym dochodziło do powstawania trąb powietrznych

opadów i gradobić. Najgroźniejsze wystąpiły w godzinach popołudniowych na terenie województw opolskiego, śląskiego i łódzkiego. Wzdłuż trasy o długości ok. 115 km pojawiały się trąby powietrzne, które zdewastowały szereg miejscowości, niszcząc ponad 900 budynków mieszkalnych i 1120 gospodarczych oraz ok. 900 ha lasów. Najpoważniejsze zniszczenia wystąpiły w miejscowościach: Sieroniuwice, Balcarzowice, Kalina, Radomsko. Szerokość pasa zniszczeń dochodziła do ok. 1000 m, lokalnie trąby osiągały siłę F3 w skali Fujity-Pearsona oraz T6 w skali TORRO. Prędkość wiatru w wirze powietrza mogła osiągać 73-83 m/s, czyli 263-299 km/godz. [Beblo et al 2010]. Ciśnienie dynamiczne wiatru wynosiło przy tych prędkościach 3277-4237 Pa, czyli 334-432 kg/m<sup>2</sup>. Ilość doziemnych wyładowań atmosferycznych w tym dniu stanowiła aż 58% ich sumy miesięcznej.

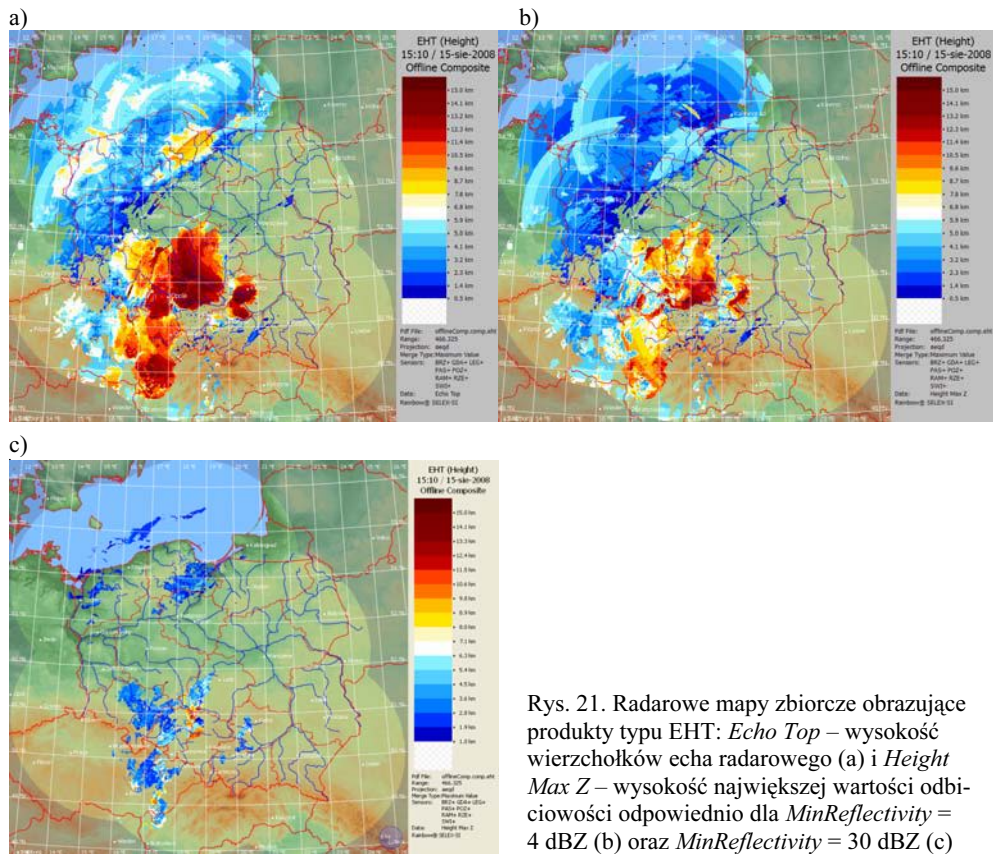


Rys. 19. Analiza opadu w zasięgu domeny systemu NIMROD godz. 15:00 UTC

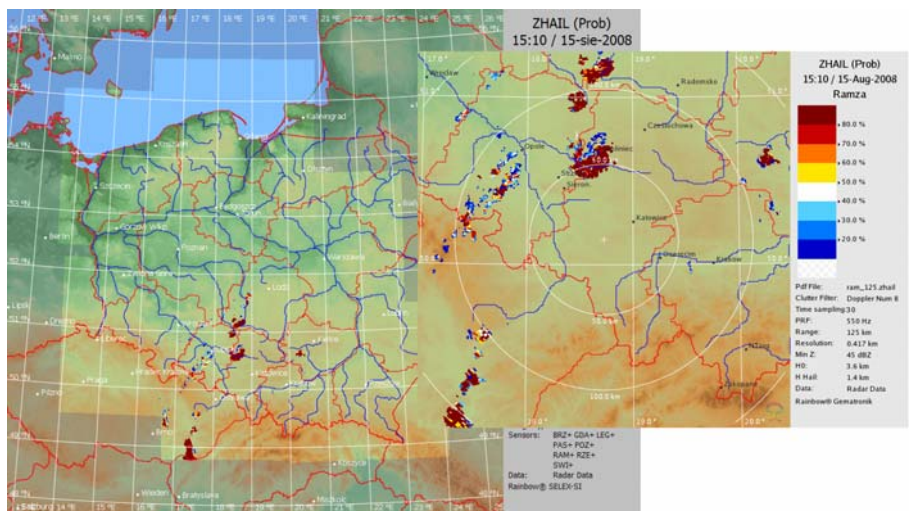


Rys. 20. Radarowe mapy zbiorcze natężenia opadu SRI (a) i maksymalnych wartości odbiciowości COMPO\_MAX (b). Elipsą zaznaczono rejon analizowanych zjawisk



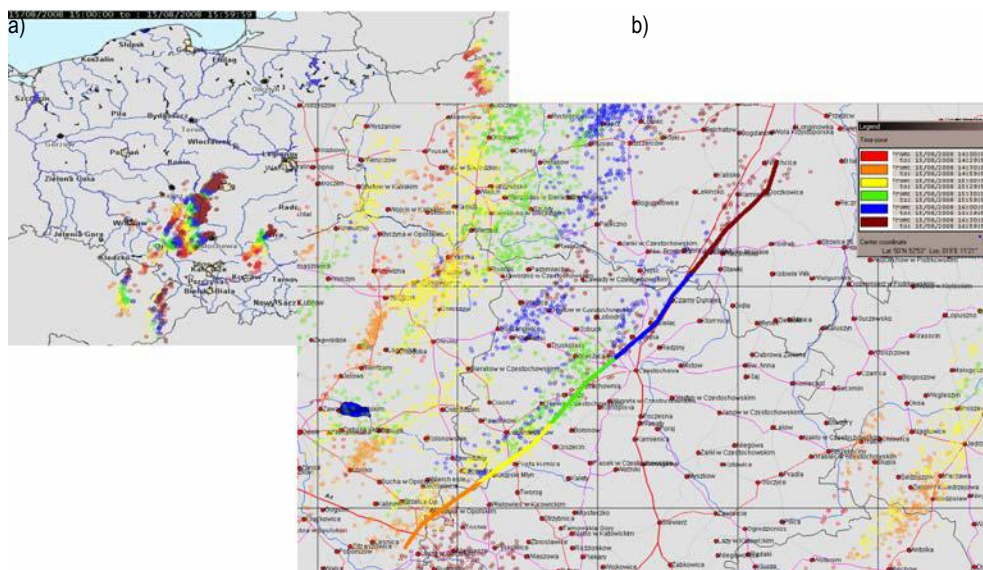


Rys. 21. Radarowe mapy zbiorcze obrazujące produkty typu EHT: *Echo Top* – wysokość wierzchołków echa radarowego (a) i *Height Max Z* – wysokość największej wartości odbiciowości odpowiednio dla *MinReflectivity* = 4 dBZ (b) oraz *MinReflectivity* = 30 dBZ (c)



Rys. 22. Mapa prawdopodobieństwa wystąpienia gradu na zbiorczej mapie radarowej typu COMPO\_ZHAIL oraz na mapie radaru Ramza





Rys 23. Mapa lokalizacji wyładowań doziemnych: a) obszar Polski z godziny 15:00 – 15:59 UTC, b) wzdłuż torów trąb powietrznych w godz. 14:00 – 17:00 UTC. Wyładowania przedstawiono za pomocą kółek, a trasę trąby za pomocą linii ciągłej. Kolor symbolu zjawiska określa przedział czasowy jego występowania opisany w legendzie

Przyczyną tak gwałtownych zjawisk było ścieranie się dwóch zróżnicowanych termicznie i wilgotnościowo mas powietrza zwrotnikowego i polarno-morskiego oraz gwałtowny rozwój chmur *cumulonimbus*, których wierzchołki przekraczały wysokość 17 km.

Porównując mapę natężenia opadów COMPO\_SRI (rys. 20a) z mapą COMPO\_MAX (rys. 20b), można zauważyć, że w analizowanym obszarze dominowała struktura *cumulonimbus incus* ("powiększenie" obszaru o niskimi wartościami odbiciowości, nie sięgającymi powierzchni ziemi). Potwierdza to mapa wysokości ech COMPO\_EHT<sub>EchoTop</sub> (rys. 21a), na której widać, że cała struktura zwieńczona była płaską warstwą ech o wysokościach powyżej 15 km. Rozmiary poziome i pionowe, wartości odbiciowości oraz wystąpienie kowadła (*incus*) wskazują na zaawansowany rozwój i bardzo wysoką intensywność zjawisk. Niebieskie kolory (tj. niskie wysokości) na mapie wysokości odbiciowości maksymalnej COMPO\_EHT<sub>HeightMaxZ</sub> z wysokim progiem parametru *MinReflectivty* = 30 dBZ (rys. 21c) pokazują, że maksimum opadów już generalnie osiągnęło powierzchnię ziemi, a ciepłe kolory (tj. duże wysokości) na wschodnim brzegu obiektu sygnalizują pochylenie całej kolumny opadowej (górną część – w kierunku wschodnim). Mapa ta pozostaje zresztą w zgodzie z mapą opadu otrzymaną z systemu NIMROD (rys. 19). Mapa COMPO\_ZHAIL (rys. 22) potwierdza wystąpienie gradu z bardzo wysokim prawdopodobieństwem na stosunkowo rozległym obszarze. Mapa lokalizacji wyładowań (rys. 23a) przez bardzo wysokie zagęszczenie wyładowań ponownie zwraca uwagę na intensywność zjawisk. Na mapie zbiorczej, ze względu na rozmiary ikon obrazujących wyładowanie, nie jest widoczna struktura zjawiska,

która jest jednak uchwycona przez system PERUN (tj. systemy automatyczne mogą z niej korzystać), a która jest widoczna po wykonaniu powiększenia (rys. 23b), na którym naniesiono (zebrane *post fatum*) informacje o trasie trąb powietrznych. Widać na nim charakterystyczny układ ścieżek, którymi wędrowały poszczególne komórki burzowe. Sekwencja kolorów pokazuje kierunek przemieszczania się zjawiska.

Należy zauważyć, że nie były to zjawiska chwilowe, lecz trwały stosunkowo długo propagując się w kierunku północno-wschodnim.

Podobne mapy wykorzystywano jako źródło wstępnie wyselekcjonowanych danych do identyfikacji typu hydrometeorów lub zjawisk meteorologicznych oraz walidacji tworzonego systemu eksperckiego.

## 5. Czynniki wpływające na jakość danych radarowych

Każdy pomiar jest obarczony błędami. Zatem niezależnie od wysiłków zmierzających do ich zminimalizowania, należy też oszacować błędy związane z każdym wykonanym pomiarem. Szczególnie pomiary teledetekcyjne, jako pomiary pośrednie, wykorzystujące określony nośnik informacji (na ogół promieniowanie elektromagnetyczne) są narażone na liczne błędy pomiarowe, o bardzo złożonej strukturze. Błędy te na ogół są trudne do oszacowania. Problematyce błędów w pomiarach radarowych poświęcono już wiele opracowań monograficznych, zarówno jeśli idzie o zdefiniowanie poszczególnych błędów, jak i ich eliminację [np. Šálek i in. 2004; Michelson i in. 2007]. Wpływ poszczególnych źródeł błędów na jakość pomiarów jest bardzo zróżnicowany, również w sieci POLRAD.

W tab. 6 zestawiono najważniejsze źródła błędów związanych z pomiarami radarami meteorologicznymi. Ze względu na dużą liczbę tych błędów i ich powiązania, wykaz taki można było skonstruować na różne sposoby. Ponieważ polskojęzyczna terminologia nie jest jeszcze ujednoczona, a zatem nie zawsze jest jednoznaczna, obok terminów polskich podano również angielskie.

W radarowych pomiarach opadu błędy pomiarowe można podzielić na dwie grupy: związane z technicznymi uwarunkowaniami, których minimalizację można traktować jako kalibrację radaru w sensie technicznym, oraz na błędy wynikające z fizycznych właściwości opadu (np. tłumienie wiązki radarowej) i z estymacji jego natężenia na powierzchnię gruntu. Duże trudności stwarza odróżnienie ech opadowych od nie opadowych, pasożytniczych.

W zależności od zastosowania danych radarowych w projektowanym systemie, różne aspekty ich jakości mogą się okazać istotne dla użytkownika.

Czynniki wpływające na jakość danych radarowych były wielokrotnie opisywane w literaturze przedmiotu [np. Collier 1989; Meischner 2004; Michelson i in. 2007; Einfalt, Michaelides 2008; Holleman i in. 2006]. Rozróżnia się trzy zasadnicze grupy czynników wpływających na jakość tych danych:

- statyczne, zasadniczo nie ulegające zmianom; poza awariami systemu,
- dynamiczne globalne zmieniające się w czasie i zależne od aktualnych warunków, które mogą zmieniać się z produktu na produkt, ale przyjmują takie same

wartości dla wszystkich punktów (pikseli) w całym produkcie (lub wolumie) radarowym,

- dynamiczne lokalnie zmieniające się w czasie, zależnie od aktualnych warunków, ale w odróżnieniu od czynników globalnych mogą zmieniać się również w obrębie pojedynczego produktu (lub wolumu), z piksela na piksel.

Tab. 6. Wykaz źródeł błędów w pomiarach radarowych [Michelson et al., 2005; 2007]

W języku polskim	W języku angielskim
Niewłaściwa lokalizacja radaru	Radar sitting
Błędy sprzętowe	Hardware
Niewłaściwa infrastruktura: instalacja elektryczna, konstrukcja wieży itp.	Infrastructure: electricity, tower structure, etc.
Błędy w orientacji anteny	Pointing error
Błędy w kalibracji radaru	Miscalibration
Tłumienie sygnału radarowego przez suchą lub moką kopułę radaru	Dry and wet radome attenuation
Tłumienie przez kopułę: pokrytą lodem, deszczem ze śniegiem, zasoloną lub brudną,	Attenuation by icy, sleety, salty or dirty radome
Niewłaściwa strategia skanowania	Scan strategy
Zmienność odbiciowości w profilu pionowym	Vertical reflectivity profile
Zmiana warunków propagacji fal w atmosferze	Propagation changes
Echa anomalnej propagacji (tzw. anaprop)	AP clutter
Tłumienie sygnału radarowego w chmurach i opadach	Attenuation by clouds and precipitation
Echa drugiego omiatańia	Second trip echoes
Listki boczne	Sidelobes
Odbicia lustrzane	Specular reflections
Rozpraszanie Bragga w czystym powietrzu	Bragg scattering from clear air
Blokowanie wiązki	Beam blockage
Całkowite przestrzelenie obiektu przez wiązkę radarową	Total beam overshooting
Echa pochodzące od morza	Sea clutter
Echa stałe (np. góry, wysokie budynki)	Ground clutter
Stada ptaków i chmury owadów	Birds, Insects
Statki	Ships
Samoloty w szumie próbkowania	Aircraft in noise samples
Zakłócenia folią antyradarową	Chaff
Pożary lasów	Forest fires
Nadajniki zakłócające sygnał, zagłuszanie	Interfering emitters, jamming
Echo rozbłyiskowe	Flare echo
Promieniowanie Słońca	Sun
Stan skupienia wody	Water phase
Grad	Hail
Niewłaściwe algorytmy tworzenia map zbiorczych	Suboptimal compositing algorithms
Niewłaściwa zależność Z-R (odbiciowość-opad)	Z-R relationship
Jakość algorytmów meteorologicznych	Meteorological algorithms
Wzmocnienie orograficzne i efekt zawietrznych stoków	Orographic enhancement and lee effects
Opady zawieszzone	Overhanging precipitation

Jednocześnie należy podkreślić, że dane pozyskane z pomiaru radarowego (dane pierwotne przetwarzane na produkty) wg określonej strategii skanowania atmosfery w momencie zapisu nie podlegają procesom weryfikacji – proces pomiaru (zbierania danych) jest nieodwracalny. Z tego też powodu bardzo istotne jest wykonanie pomiaru z wykorzystaniem strategii skanowania, która w miarę pozyskiwania nowych możliwości systemowych (kolejnego upgrade’u systemu) i wniosków wynikających z bieżących analiz, jest ustawicznie optymalizowana.

## 6. Podsumowanie

Produkty systemów teledetekcji naziemnej eksploatowanych w Ośrodku Teledetekcji Naziemnej IMGW-PIB umożliwiają – praktycznie w czasie rzeczywistym – monitoring atmosfery i zobrazowanie zmian w niej zachodzących. Problemem operacyjnym jest w tym przypadku właściwa interpretacja dużych ilości pozyskanych informacji.

Prowadząc analizy algorytmów, wykorzystując możliwości konfiguracji produktów, właściwości i niedoskonałości pomiaru teledetekcyjnego oraz czynników wpływających na jakość generowanych produktów oceniano stan istniejący i możliwości jego modyfikacji pod kątem przydatności do operacyjnego i automatycznego generowania ostrzeżeń dla użytkowników końcowych.

Wykorzystując pozyskane w procesie analizy doświadczenie określono wpływ poszczególnych czynników na wartość użyteczną produktów finalnych. Przy czym przez pojęcie „wartość użyteczna” rozumiano zdolność produktów (grupy produktów) do wyrażenia aktualnego stanu atmosfery i możliwość określenia zjawisk meteorologicznych w niej zachodzących. Dokonywano konfrontacji wygenerowanych zestawów wybranych produktów standardowych i dodatkowych, dla wybranych przypadków określonych zdarzeń meteorologicznych.

Wynikiem takiego podejścia jest ocena systemu POLRAD i PERUN w zakresie generowania produktów dodatkowych wzbogacających informacje o określonych zjawiskach oraz sformułowanie zasad ich tworzenia.

### Literatura

- Battan L.J., 1973, Radar observation of the atmosphere, The University Chicago Press, Chicago Illinois U.S.A.
- Bebłot G., Dubiel B., Konarski J., Tuszyńska I., 2010, Groźne zjawiska na terenie Polski w dniu 15 sierpnia 2008r., [w:] Ryzyko w problemach zagrożeń środowiska, IMGW, Warszawa
- Bodzak P., 2007. Detekcja i lokalizacja wyładowań atmosferycznych, IMGW, Warszawa
- Collier C.G. (red.), 1989, Applications of weather radar systems. A guide to uses of radar data in meteorology and hydrology, Ellis Horwood Ltd., Chichester
- Einfalt T., Michaelides S., 2008, Quality control of precipitation data. In: Michaelides S. (red.), Precipitation: Advances in measurement, estimation and prediction, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg
- Gekat F. i in., 2004, The state of weather radar operations, networks and products, In: Weather radar. Principles and advanced applications (red. P. Meischner). Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg, 1-51

- Golding B.W., 1998, NIMROD: A system for generating automated very short range forecasts, Meteor. Appl. 6
- Harrison D., 1994a, Nimrod System, Documentation Paper No.1, Nimrod Programming Standards, Version: 2.05, Date: 28/04/94, Met Office UK
- Harrison D., 1994b, Nimrod System, Documentation Paper No.3, Naming convention for Nimrod data files, X, Version: 1.0, Date: 28/04/94, Met Office UK
- Holleman I., Michelson D., Galli G., Germann U., Peura M., 2006, Quality information for radars and radar data. OPERA, WP 1.2
- Instruction Manual –Rainbow<sup>®</sup> 5, 2007, Part 1 i 2, Release 5.18.0, SELEX Sistemi Integrati: Quick Guide, User Guide, Configuration Guide, Products & Algorithms, File Format
- Instruction Manual –Rainbow<sup>®</sup> 5, 2010, Part 1 i 2, Release 5.31.0, SELEX Sistemi Integrati: Quick Guide, User Guide, Configuration Guide, Products & Algorithms, File Format
- Johnson C., 1998, A description of the methods used in the current Nimrod anaprop removal scheme. Observation Based Products Tech. Report No. 10, February 5
- Michelson D. i in. (w tym Jurczyk A.), 2007, Kontrola jakości danych z radarów meteorologicznych w Europie. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa (tłumaczenie oryg. z 2005)
- Moszkowicz S., Tuszyńska I., 2003. Meteorologia radarowa, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa
- Šálek M. i in., 2004, Radar techniques for identifying precipitation type and estimating quantity of precipitation, COST Action 717, Working Group 1 – A review. Luxembourg 2005
- Szturc J., Ośródko K., Jurczyk A., 2007, Parameterisation of radar precipitation quality index scheme on raingauge data, 33<sup>rd</sup> Conf. on Radar Meteorology Proceedings, AMS, Cairns, Australia (CD), August 2007
- Tuszyńska I., 2005, Wykorzystanie technologii VSAT w sieci radarów meteorologicznych POLRAD, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa
- Weipert A., Pierce C., 2003, Multi sensor supported flood detection and monitoring system for Poland. 31<sup>st</sup> Conf. on Radar Meteorology Proceedings (vol. II), AMS, Seattle

# **Dane z satelitów meteorologicznych w prognozowaniu i monitorowaniu groźnych zjawisk pogodowych**

*Piotr Struzik, Bożena Łapeta, Rafał Iwański, Monika Pajek,  
Danuta Serafin-Rek*

## **1. Wprowadzenie**

W ostatnim dziesięcioleciu system satelitów meteorologicznych został kompletnie przebudowany, przez wprowadzenie satelitów geostacjonarnych drugiej generacji (METEOSAT 8 i 9) oraz pierwszego europejskiego meteorologicznego satelity okołobiegunowego METOP-A. Zainstalowane na pokładach tych satelitów przyrządy stwarzają większe możliwości ich wykorzystania w diagnostyce i ultrakrótkoterminowej prognozie pogody. Niemniej, w związku z pojawieniem się nowych satelitów ilość informacji satelitarnej dostępnej dla synoptyka wielokrotnie wzrosła. Co więcej, wraz z planowanym rozwojem systemów satelitarnych dla meteorologii (systemy MTG i EPS-SG), ilość danych operacyjnych w kolejnych latach będzie szybko rosła. Istnieje zatem potrzeba przygotowania systemu wstępnej automatycznej analizy danych, który zwracałby uwagę synoptyka, szczególnie na możliwość wystąpienia procesów/zjawisk stanowiących potencjalne zagrożenie.

## **2. Wykorzystanie danych satelitarnych do prognozowania i monitorowania groźnych zjawisk pogodowych**

Realizowany w ramach projektu KLIMAT system automatycznej analizy wykorzystuje m.in. produkty oparte na danych satelitarnych. Opracowano nowe oraz zaadaptowano istniejące produkty satelitarne, aby umożliwić ich wykorzystanie do ostrzegania w sytuacjach zagrożeń. Wybrano trzy kategorie zjawisk meteorologicznych stanowiących potencjalne zagrożenie: burze, sytuacje związane z ograniczoną widzialnością (mgła i chmury niskie stratus) oraz silny wiatr.

Aktualna konstelacja satelitów meteorologicznych składająca się z satelitów geostacjonarnych METEOSAT oraz polarnych: NOAA, METOP-A, FengYun pozwala na obserwację i analizę procesów zachodzących w atmosferze w zakresie: światła widzialnego, bliskiej podczerwieni, podczerwieni termalnej, wykorzystanie

kanałów absorpcji pary wodnej i CO<sub>2</sub>, sondaż atmosfery z wykorzystaniem pasm absorpcji w podczerwieni i w zakresie mikrofal aż po najnowsze aktywne czujniki mikrofalowe (np. ASCAT).

Jedną z ważniejszych ról pełnią satelity geostacjonarne Meteosat Drugiej Generacji (aktualnie METEOSAT 8 i 9), dostarczające zobrazowania w 12 kanałach spektralnych w trybie 15-minutowym (podstawowy) oraz w trybie 5-minutowym (Rapid Scan) z rozdzielczością 3 km na równiku dla 11 kanałów i 1 km dla kanału HRV. Zastosowania poszczególnych kanałów spektralnych przedstawia tab. 1.

Tab.1. Podstawowe zastosowanie poszczególnych kanałów spektralnych radiometru METEOSAT/SEVIRI

Kanał	Zastosowanie
0,6 i 0,8 μm	Wykrywanie chmur, identyfikacja obiektów, śledzenie chmur, aerozol, monitorowanie wegetacji
1,6 μm	Rozróżnienie śniegu od chmur, chmur wodnych od lodowych, detekcja mgły w dzień
3,9 μm	Detekcja niskich chmur i mgły (dzień i noc). Temperatura powierzchni w nocy. Chmury wodne/lodowe, komórki burzowe – <i>overshooting tops</i>
6,2 i 7,3 μm	Para wodna w średniej i górnej troposferze. Dynamika troposfery. Intensywny opad konwekcyjny, wlewy stratosferyczne
8,7 μm	Rozróżnienie chmur wodnych od lodowych, detekcja mgieł – przez całą dobę
9,7 μm	Ozon – dane do modeli NWP. Procesy zachodzące w dolnej stratosferze i górnej troposferze
10,8 i 12,0 μm	Całodobowe śledzenie zachmurzenia. Pomiar temperatury powierzchni ziemi i morza, wierzchołków chmur. Detekcja chmur Cirrus
13,4 μm	Określanie wysokości chmur półprzezroczystych Wykorzystywany do określania stabilności atmosfery
HRV 0,4-1,1 μm	Kanał o podwyższonej rozdzielczości – początki konwekcji, zjawiska falo-we, lokalna mgła w porze dziennej

Satelity okołobiegunowe umieszczone na niskich orbitach stabilizowane w trzech osiach, oprócz wyższej rozdzielczości przestrzennej (1 km w punkcie podsatelitarnym) mają poza przyrządami obrazującymi szereg dodatkowych przyrządów przydatnych w analizie procesów atmosferycznych. I tak:

- Satelity serii NOAA są wyposażone w:
  - radiometr skanujący AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) – 6 kanałów spektralnych,
  - przyrząd HIRS (*High Resolution Infrared Sounder*) do sondażu atmosfery w oparciu o pasma absorpcji w podczerwieni,
  - przyrząd AMSU (*Atmospheric Sounding Unit*) do sondażu atmosfery w oparciu o pasma absorpcji w zakresie mikrofal.
- Satelita europejski METOP-A oprócz przyrządów analogicznych do satelitów NOAA ma dodatkowo takie przyrządy, jak:
  - ASCAT – skatterometr: aktywny przyrząd mikrofalowy do badania pola wiatru na morzu, wilgotności gleby, pokrywy śnieżnej i lodowej,

- IASI – interferometr Michaelsona – przyrząd hyperspektralny mający 8500 kanałów do sondowania i analizy atmosfery.
- GRASS – przyrząd do sondażu atmosfery z wykorzystaniem satelitów GPS.
- Najnowszy satelita meteorologiczny NPP (NPOESS Preparatory Program) cechuje się podwyższoną rozdzielczością przestrzenną zaczynającą się od 370 m oraz zwiększoną do 16 liczbą kanałów radiometru obrazującego VIIRS.

Informacja z satelitów okołobiegunowych jest dostępna kilkanaście razy na dobę ze względu na ich liczbę – aktualnie: NOAA – 15, 16, 17, 18, 19, METOP-A, Feng Yun 1D, NPP.

Wszystkie omawiane i prezentowane na rysunkach produkty satelitarne są efektem przetworzenia surowych danych satelitarnych METEOSAT i NOAA rejestrowanych Ośrodkiem Teledetekcji Satelitarnej IMGW w Krakowie.

## 2.1. Burze

Głęboka konwekcja i burze są jednymi z ważniejszych zjawisk meteorologicznych stwarzających zagrożenia takie jak: wyładowania atmosferyczne, opad nawalny, grad, silny wiatr, trąby powietrzne, zagrożenia dla lotnictwa. Burze są procesami trudnymi do prognozowania ze względu na swój lokalny charakter i stosunkowo krótki czas trwania oraz właściwości istniejących modeli numerycznych. Informacja pochodząca z satelitów meteorologicznych zasadniczo jest przeznaczona do diagnozy aktualnej sytuacji meteorologicznej, ale jest wykorzystywana również w prognozie ultrakrótkoterminowej (nowcastingu) i krótkoterminowej. Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie produktów satelitarnych wspomagających synoptyka w analizie i krótkoterminowej prognozie burz. Produkty te znajdują zastosowanie w analizie całego procesu powstawania i ewolucji chmur konwekcyjnych, poczynając od sytuacji bezchmurnej, kiedy to są określane parametry sprzyjające rozwojowi głębokiej konwekcji, przez etap rozwoju chmur konwekcyjnych, a następnie etap ewolucji burz, aż do ich zaniku.

W okresie przed rozwojem konwekcji są wykorzystywane produkty satelitarne pozwalające na określenie stabilności atmosfery, która jest jednym z czynników istotnie wpływających na rozwój głębokiej konwekcji. Tu znajdują zastosowanie produkty opracowywane centralnie przez Organizację EUMETSAT – MPEF GII zawierające wskaźniki: K-Index, Lifted Index oraz całkowitą zawartość pary wodnej. Lokalna implementacja oprogramowania EUMETSAT pozwala dodatkowo na określenia zawartości pary wodnej w poszczególnych warstwach atmosfery oraz określenie pionowych profili temperatury i wilgotności na podstawie prognozy z modelu numerycznego oraz po skorygowaniu przy wykorzystaniu danych satelitarnych. Równie przydatne są produkty generowane przy wykorzystaniu oprogramowania EUMETSAT NWC-SAF, w tym wskaźniki stabilności (SAI – *Stability Analysis Imagery*) oraz zawartości pary wodnej (LPW – *Layer Precipitable Water*). Dodatkowym produktem wskazującym na czynniki zwiększające lub hamujące konwekcję jest produkt MPEF- DIV – dywergencja w górnej troposferze. Oprócz produktów opartych na danych z satelitów geostacjonarnych możliwe jest



wykorzystanie danych z satelitarnych sondaczy w oparciu o dane ATOVS/NOAA, zarówno w postaci profili, jak i poziomych rozkładów wybranych parametrów na różnych poziomach barycznych.

W fazie inicjacji konwekcji mamy do dyspozycji szereg produktów satelitarnych, poczynając od zwykłego zobrazowania, szczególnie w kanale HRV, oraz z wykorzystaniem trybu Rapid Scan (5-minutowy cykl skanowania), a także z wykorzystaniem informacji z kanałów w świetle widzialnym (VIS), podczerwieni termalnej (IR) i kanałach absorpcji pary wodnej (WV). Na tym etapie dużą pomocą są kompozycje barwne RGB ukazujące mikrofizyczną strukturę powierzchniowej warstwy chmury i jej ewolucję (*Day Microphysics, Convection RGB, Airmass*), a także specjalizowane produkty: CI (*Convection Initiation*), RDT (*Rapid Developing Thunderstorms*), wysokość wierzchołków chmur (CTH), typ chmur (CT).

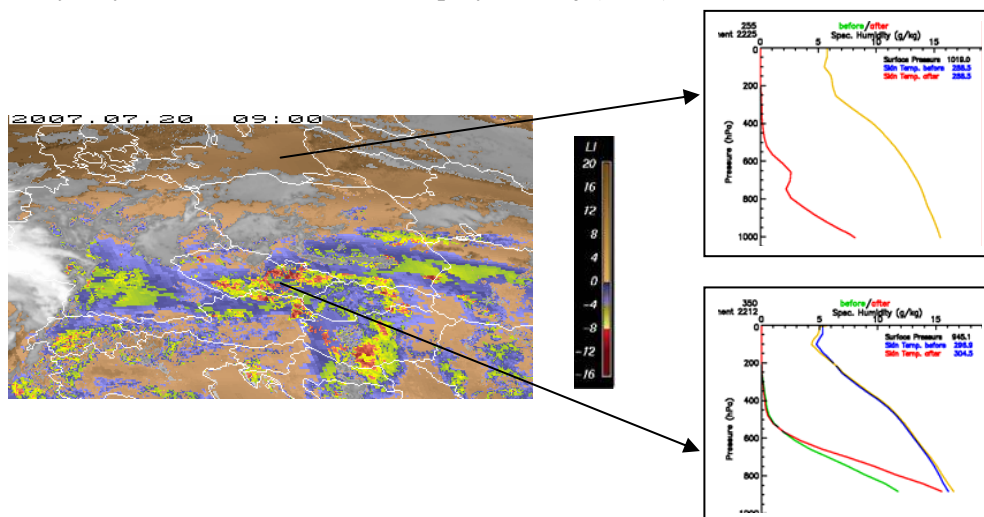
Na etapie rozwiniętej konwekcji i burz istnieje możliwość monitorowania procesów zachodzących w komórkach burzowych i oceny ich aktywności przy wykorzystaniu zobrazowania w poszczególnych kanałach, obrazów różnicowych (produkt WV-IR *Overshooting Tops*), doboru palety barwnej (paleta M. Setvaka), kompozycji HRV+IR (*Sandwich Product*) oraz wykorzystania szeregu produktów dotyczących intensywności opadu (CRR – *Convective Rainfall Rate*, MPE – *Multi-sensor Precipitation Estimates*), jak również łączenia informacji satelitarnej z detekcją wyładowań z systemu PERUN pozwalającą na lokalizację najbardziej aktywnych elektrycznie obszarów komórek burzowych.

#### 2.1.1. Etap przed rozwojem chmur konwekcyjnych – produkty dotyczące stabilności atmosfery uzyskiwane z danych satelitarnych METEOSAT i NOAA

Stabilność atmosfery jest jednym z ważniejszych czynników mających związek z występowaniem konwekcji. W niestabilnych masach powietrza o dostatecznej wilgotności w dolnej troposferze, występują korzystne warunki do powstawania intensywnej konwekcji. W warunkach sprzyjających wznoszeniu (np. nagrzewanie powierzchni, konwergencja, wpływ orografii) z dużym prawdopodobieństwem można oczekiwać pojawienia się intensywnej konwekcji i burz.

Do analizy warunków sprzyjających konwekcji są wykorzystywane produkty GII w skali globalnej, opracowywane przez EUMETSAT MPEF (*Meteorological Products Extraction Facility*), i regionalnej (lokalna instalacja oprogramowania GII) oraz produkty NWC-SAF (*Nowcasting Satellite Application Facility*). Rozdzielczość produktów globalnych wynosi 15x15, a od 2010 r. 3x3 piksele radiometru SEVIRI/MSG, lokalnych – od 1 piksela SEVIRI, a produktów NWC-SAF – 1 piksel. W metodzie fizycznej, która stosowanej do uzyskania profili temperatury i wilgotności, a co za tym idzie wskaźników niestabilności atmosfery, używa się danych z modeli numerycznych (NWP) jako pierwszego przybliżenia. Kolejnym krokiem jest wykorzystanie danych satelitarnych (6 kanałów SEVIRI) do korekcji prognozowanych profili do warunków aktualnych, przez minimalizację błędu między rzeczywistym pomiarem satelitarnym a symulowanym za pomocą modelu

RTTOV z prognozowanych przez NWP profili. Produkt GII to właściwie 5 produktów obejmujących wskaźniki K-Index, Lifted Index, KO Index, Maximum Buoyancy oraz całkowitą zawartość pary wodnej (TPW).



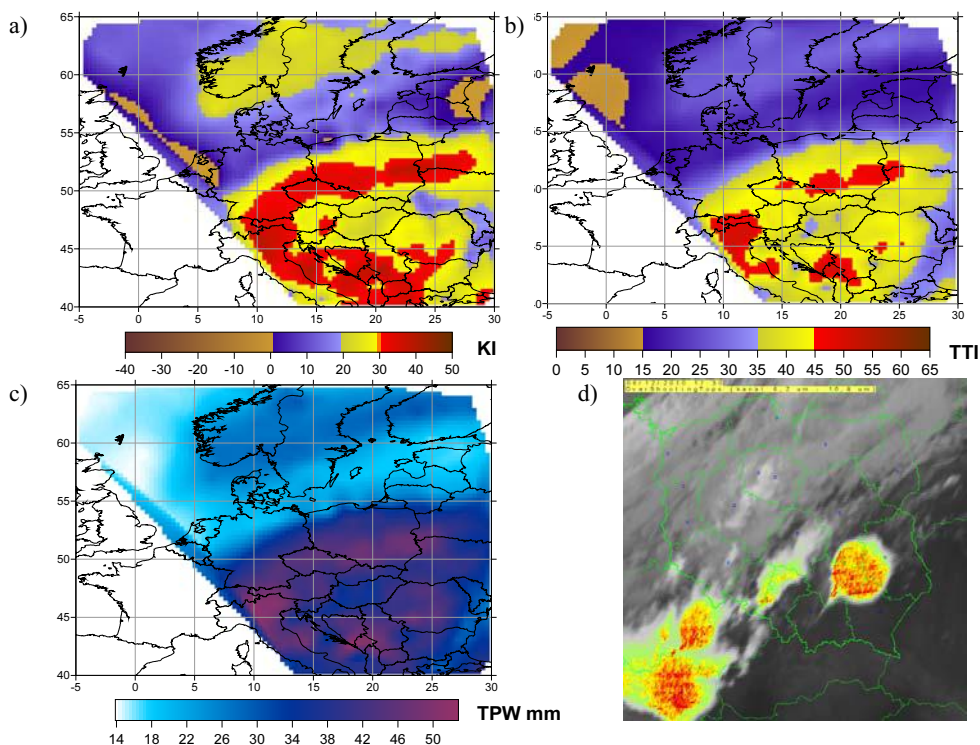
Rys. 1. Korekta prognozowanych przez NWP profili temperatury i temperatury punktu rosy w procedurze wykorzystującej dane satelitarne do fizycznego odtwarzania aktualnych profili – duża korekta dla sytuacji niestabilnych. Rozkład przestrzenny Lifted Index dla 20.07.2007 09:00 z nałożonym obrazem z kanału MSG 10,8 IR w miejscach zachmurzonych

Profile pionowe temperatury i wilgotności liczone na podstawie pierwszego przybliżenia (rys. 1) i odtworzone z użyciem danych satelitarnych wskazują, że w obszarach niestabilnych dane satelitarne aktualizują w większym stopniu profile pionowe wilgotności, a w mniejszym temperatury. Wskazuje to na istotną wartość dodaną w stosunku do prognoz numerycznych.

Analizy pokazały, że produkt PGE 8/SAI na naszych szerokościach geograficznych wskazuje prawie zawsze stabilną atmosferę, nawet podczas gwałtownych burz, gdy wskaźniki stabilności liczone za pomocą innych metod pokazują duże zróżnicowanie. Z tego powodu w czerwcu 2010 konsorcjum NWC-SAF udostępniło nowy produkt PGE 13/SAI. Należy podkreślić, że na podstawie dotychczasowych wyników wskaźniki stabilności atmosfery nie tylko wskazują na możliwość wystąpienia konwekcji, ale także na brak takich czynników (małe wartości wskaźników stabilności atmosfery), co jest również istotnym prognostykiem.

### 2.1.2. Produkty wykorzystujące dane satelitarne NOAA/TOVS

Dane z satelitów okołobiegunowych NOAA nie są dostępne tak często jak dane z satelitów geostacjonarnych. Praktycznie przy wykorzystaniu 4 satelitów dane są dostępne co około 3 godziny. Jednak satelity na niskich orbitach (ok. 860 km) mają czujniki niespotykane na geostacjonarnych. Są to przyrządy HIRS (High Resolution Infrared Sounder) i AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) pozwalające na sondaż atmosfery z wykorzystaniem metod fizycznych.



Rys. 2. Rozkłady KI (a), TTI (b) oraz TPW (c) uzyskane z danych NOAA/TOVS, 12.06.2010, 11:49 UTC oraz OverShooting Tops (6,2 $\mu$ m-10,8 $\mu$ m) dla godz. 17:30 UTC (d)

Dane uzyskane z sondażu satelitarnego: temperatura i wilgotność, są pomocne przy określaniu aktualnego stanu atmosfery (stabilności i zasobu pary wodnej) i ocenie potencjalnych możliwości powstawania głębokiej konwekcji.

Spośród wielu wskaźników stabilności atmosfery wybrano dwa, których obliczenie na podstawie danych TOVS nie wymaga dodatkowych informacji, chociażby o ciśnieniu przy powierzchni Ziemi, a które mogą być pomocne przy prognozowaniu zjawisk burzowych. Te wskaźniki to:

- K-Indeks (KI) [George 1960]

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + TD_{850} - (T_{700} - TD_{700})$$

- TT Indeks (TTI) [Seemann et al. 2006]

$$TTI = T_{850} + TD_{850} - 2T_{500}$$

gdzie:  $T_{850}$ ,  $T_{700}$  i  $T_{500}$  – temperatura oraz  $TD_{850}$ ,  $TD_{700}$  i  $TD_{500}$  – temperatura punktu rosy na poziomach barycznych 850 hPa, 700 hPa i 500 hPa;

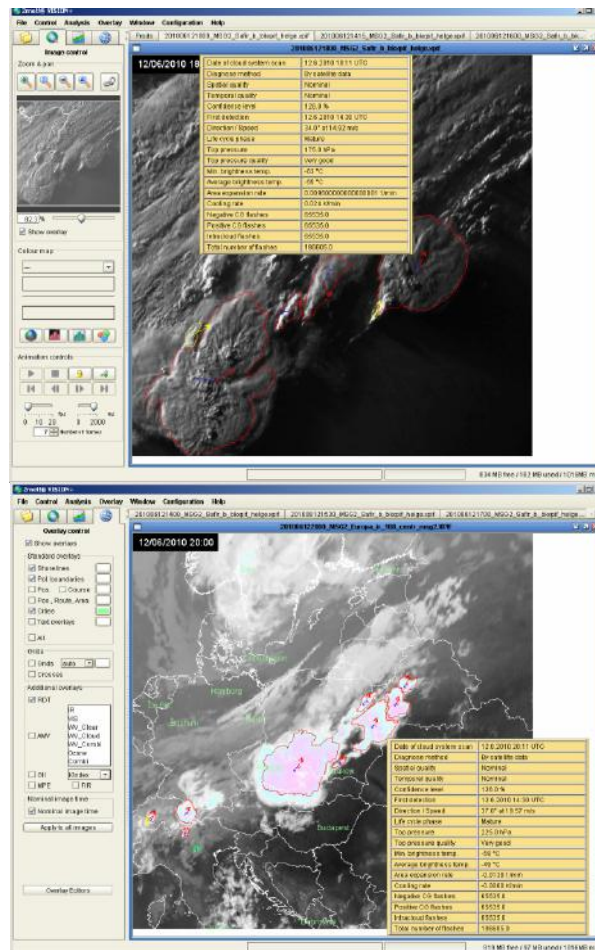
Na rysunkach 2a-c przedstawiających rozkłady tych parametrów dla transmisji z 11:49 UTC łatwo zauważyć rozciągający się równoleżnikowo na południu Polski obszar podwyższonych wartości wszystkich parametrów: wartości TTI przekraczają 45°C, KI – 30°C, a TPW – 40 mm. W rejonie tym, w godzinach popołudniowych zanotowano burze (rys. 2d produkt OST 17:30 UTC).

### 2.1.3. Produkty satelitarne wspomagające analizę początkowej fazy rozwoju konwekcji

Przykładem zaawansowanych algorytmów są produkty RDT oraz CI odnoszące się do szczególnie interesującej fazy inicjacji konwekcji. W założeniu powinny pomóc w rozpoznaniu i monitorowaniu komórek konwekcyjnych, będących początkiem głębokiej konwekcji.

#### Produkt RDT

Produkt RDT (*Rapid Developing Thunderstorm*) został stworzony w ramach konsorcjum NWC SAF w celu wykrywania gwałtownie rozwijających się komórek konwekcyjnych, jako pomoc w prognozowaniu krótkoterminowym i ostrzeganiu przed zbliżającymi się zagrożeniami.



Rys. 3. Produkt RDT v. 2009 nałożony na obraz satelitarny w świetle widzialnym (u góry) i w podczerwieni (u dołu)

Produkt powinien wykrywać komórki burzowe, śledzić je i przede wszystkim odróżniać fazę rozwoju (rosnące, dojrzałe, powstałe z połączenia dwóch lub więcej). Jako dane wejściowe są wykorzystywane dane z satelity Meteosat 9 – kanał infrared 10,8  $\mu\text{m}$  – wersje do 2.1 – z roku 2008. W najnowszej wersji (z roku 2009) – zaimplementowanej w OTS w styczniu 2010 – poprawiono znacznie algorytm wykrywania komórek konwekcyjnych zgodnie z sugestiami użytkowników i wynikami walidacji (rys. 3). Obecnie dodatkowo są używane kanały 6,2 i 7,3  $\mu\text{m}$ . Jako dane dodatkowe służą dane o wyładowaniach atmosferycznych (doziemnych). Dla wersji z 2009 roku wyniki walidacji wg dokumentacji konsorcjum NWC SAF ([www.nwcsaf.org/2010UsersWS/SAF-NWC-CDOP-INM-MGT-2010-US+WS\\_v1.1.pdf](http://www.nwcsaf.org/2010UsersWS/SAF-NWC-CDOP-INM-MGT-2010-US+WS_v1.1.pdf)) osiągają 71% POD (*probability of detection*) dla rozpoznania komórek, przy małych wartościach POFD (*probability of false detection*). Również detekcja komórek jest bardziej stabilna w czasie.

Produkt RDT, oprócz detekcji obwiedni komórki konwekcyjnej, zawiera szereg informacji m.in. minimalną i maksymalną temperaturę wierzchołków chmur, godzinę pierwszego rozpoznania śledzonej komórki, szybkość ochładzania się wierzchołka chmury i szybkość wzrostu obszaru komórki. Najnowsza wersja oprogramowania z 2009 roku zawiera poprawione algorytmy w stosunku do wersji poprzedniej, jednak zgodnie z zaobserwowanymi przez nas wynikami produkt jeszcze nie w pełni zaspokaja pokładane w nim oczekiwania. Główne problemy to:

- niewykrywanie wszystkich komórek konwekcyjnych prowadzących do rozwoju wysokiej konwekcji,
- zaznaczanie chmury Cirrus (*CI*) jako komórek konwekcyjnych, szczególnie w układach frontalnych,
- wykrywanie wielu komórek konwekcyjnych wciąż dopiero w późnej fazie (zaznaczane jako komórki dojrzałe – czerwony kolor).

#### *Produkt CI*

Produkt CI (*Convection Initiation*) opracowano na Uniwersytecie Wisconsin. Jest to dzienny algorytm, który na podstawie maski chmur konwekcyjnych i szybkości ochładzania się wierzchołków chmury oraz spełnienia szeregu testów statystycznych wyznacza lokalizację potencjalnie niebezpiecznej komórki konwekcyjnej, mogącej doprowadzić do powstania burzy. Produkt wykorzystuje kilka rodzajów danych satelitarnych – selekcionuje te komórki, które później będą zaczątkiem gwałtownej konwekcji. Powinien je wskazywać zanim będą widoczne na radarze.

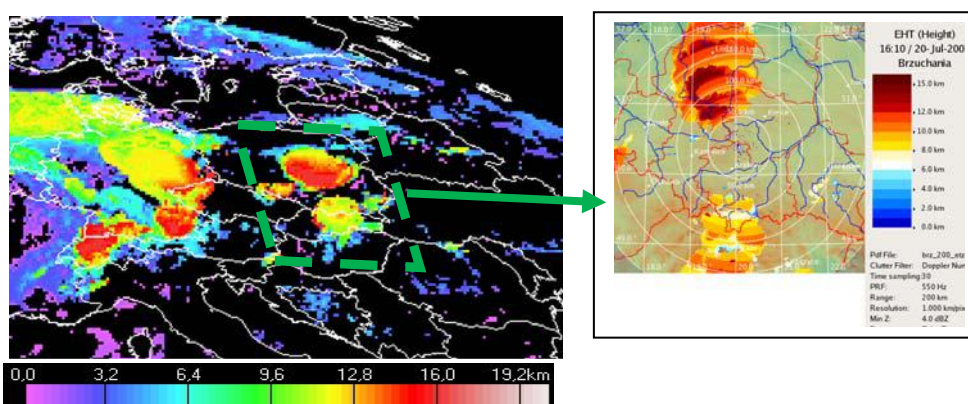
Wstępne wyniki okazały się obiecujące, lecz badana wersja algorytmu nie jest przydatna do pracy operacyjnej, gdyż wyznaczenie potrzebnych do przetwarzania półproduktów (m.in. maski chmur konwekcyjnych) trwa zbyt długo. Prowadzone są prace nad optymalizacją kodu, zmodyfikowanym wskaźnikiem CI oraz będącym jeszcze w fazie testowej, tzw. *Lightning Initiation*, którego algorytm wydaje się być bardziej obiecujący niż CI w warunkach europejskich. Prace nad tymi produktami są prowadzone w ramach Convective Working Group w ścisłej kooperacji z EUMETSAT-em.



#### 2.1.4. Produkty satelitarne do monitorowania zjawisk w fazie głębokiej konwekcji i burz

##### *Produkt CTH (Cloud Top Height – wysokość wierzchołków chmur)*

Jest to produkt MPEF (Meteorological Products Extraction Facility) zdefiniowany w EUMETSAT i rozsyłany w formie cyfrowej przez system EUMETCast w docelowym formacie GRIB. Jest pomocny w analizie i wyodrębnianiu wysoko wypiętrzonych chmur – potencjalnych komórek burzowych. Jego zaletą jest wprowadzenie korekcji dla półprzezroczystych cienkich chmur (Ci) i korekcji uwzględniającej stopień pokrycia chmurami piksela sklasyfikowanego jako zachmurzony (*Effective Cloudiness*), co wspomaga monitorowanie głębokiej konwekcji



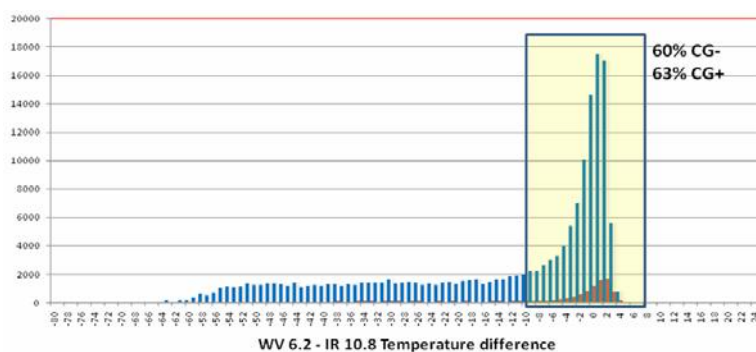
Rys. 4. Produkt satelitarne *wysokość wierzchołków chmur* (CTH) oraz odpowiadający mu produkt radarowy EHT dla sytuacji z dnia 20.07.2007 godz. 16 10 UTC (wystąpienie trąby powietrznej)

Przykład produktu CTH dla nadzwyczaj wysoko wypiętrzonych chmur w dniu 20.07.2008 (trąba powietrzna pod Częstochową) przedstawiono na rys. 4, wraz z odpowiadającym produktem radarowym z radaru Brzuchania. Zaobserwowano dobrą zgodność produktu satelitarnego i radarowego. Najwyższe chmury o wierzchołkach ok. 16 km znajdują się w obszarze mezoskalowego systemu konwekcyjnego, którego konsekwencją były: trąby powietrzne, grad, opady nawalne i silny wiatr.

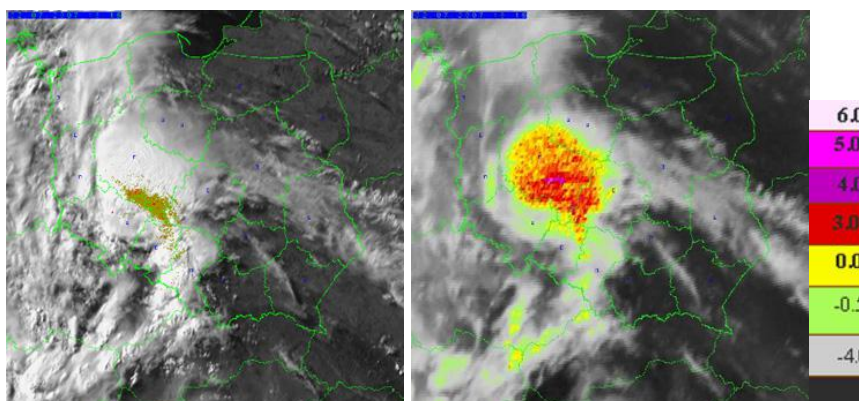
##### *Produkt OST (Overshooting Tops – Burze kanał WV-IR)*

Produkt satelitarne OST – wspomagający lokalizację i monitorowanie bardzo wysokiej konwekcji zdefiniowany na podstawie danych z satelity geostacjonarnego Meteosat drugiej generacji – jest to tzw. obraz różnicowy. Obraz wyjściowy jest różnicą temperatury jasnościowej dwóch kanałów spektralnych satelity Meteosat 9 (lub 8): kanału WV (pary wodnej) 6,2  $\mu\text{m}$  i kanału IR (podczerwień) 10,8  $\mu\text{m}$ . Na podstawie dodatniej różnicy temperatury w tych kanałach lokalizujemy najbardziej aktywny obszar chmury konwekcyjnej. Wypiętrzone wierzchołki, powiązane zwykle z silnymi burzami, rozciągają się powyżej kowadła i prawdopodobnie sięgają stratosfery. Teoria tłumacząca powstawanie OST dopiero powstaje. Empirycznie potwierdzono, że im większa jest dodatnia różnica temperatury kanałów WV i IR,

tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia gwałtownych zjawisk na Ziemi (silne burze, gwałtowne opady, grad, silny wiatr itp.) Produkt OST pozwala na monitorowanie rozwoju konwekcji z krokiem 15- (lub 5-) minutowym przez całą dobę (wykorzystuje wyłącznie kanały w podczerwieni termalnej).



Rys. 5. Liczba wyładowań doziemnych ujemnych (kolor niebieski) i dodatnich (kolor czerwony) powstałych w chmurach o określonej na wykresie różnicy temperatury WV-IR – na podstawie analizy całego sezonu burzowego IV-IX.2009



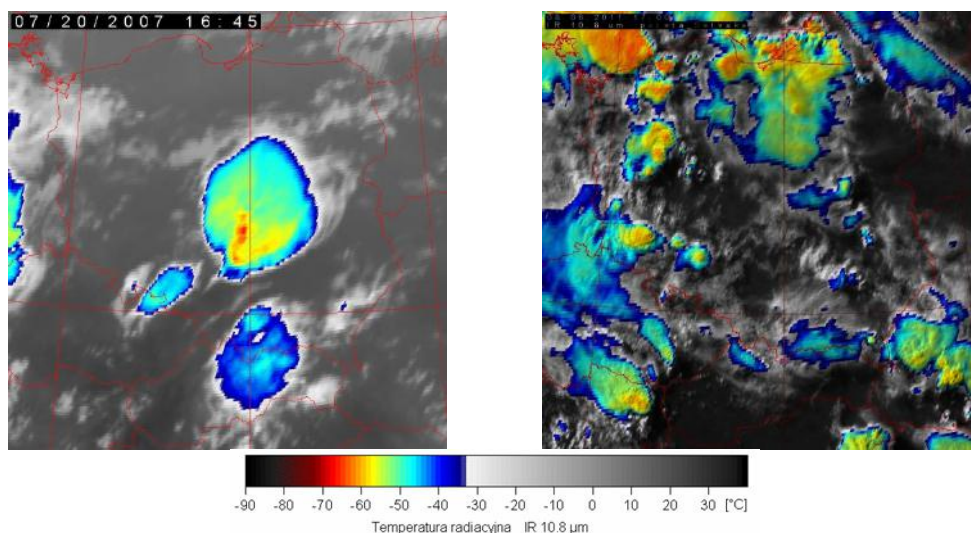
Rys. 6. Produkty służące do lokalizacji i monitorowania burz z 2 lipca 2007, 16:15 UTC: obraz HRV z nałożonymi wyładowaniami z systemu Perun (z lewej strony), wyładowania międzychmurowe – kolor żółty, wyładowania doziemne – kolor czerwony oraz produkt Overshooting Tops (z prawej strony)

Jest to produkt w dużej mierze weryfikowany empirycznie, o nieustalonej do końca fizyce, wykazuje jednak dobrą zgodność z rejestrowaną aktywnością elektryczną burz. Analizę zależności między doziemnymi wyładowaniami atmosferycznymi rejestrowanymi przez system PERUN a obserwowaną z satelity różnicą temperatury kanałów WV-IR dla całego roku 2010 zaprezentowano na rys. 5 [Struzik 2011]. Produkt OST dobrze lokalizuje miejsca występowania najsilniejszego prądu wstępującego, szczególnie w początkowym okresie rozwoju komórki burzowej. Największa różnica temperatury (na podstawie analizy wyselekcjonowanych przypadków wystąpienia trąb powietrznych: 20.07. i 21.08.2007, 15 i 16.08. 2008, 22 i 23.06.2009) wynosiła 6,5°C i pojawiała się w czasie zaobserwowanych trąb

powietrznych. Wyróżniono również obszary o różnicy temperatury jasnościowej w przedziale od  $-4,0$  do  $0^{\circ}\text{C}$ , jako potencjalne obszary rozwoju gwałtownej konwekcji (rys. 6).

#### Produkt IR 10.8 enh

Produkt jest zdefiniowany na podstawie kanału okna atmosferycznego – IR  $10,8\ \mu\text{m}$  satelity geostacjonarnego Meteosat 8 i 9. Produkt ten, wykorzystując pośrednią zależność ochładzania się troposfery ze wzrostem wysokości (im zimniej tym wyżej), określa obszary najchłodniejsze, a więc najwyżej wypiętrzone chmury. Dla celów oceny jakościowej i ilościowej przygotowano i zaimplementowano sztuczna paletę barwną, zgodną z międzynarodowymi standardami (paleta Setvaka). Paleta ta jednocześnie definiuje wstępne progi, określające najwyższe części chmury, gotowe do zaimplementowania w systemie eksperckim. Opracowano również produkt łączący informację z kanału widzialnego o podwyższonej rozdzielczości HRV z kanałem IR, tzw. Sandwich produkt (rys. 8), dzięki czemu możliwe jest wykorzystanie dodatkowej informacji o teksturze chmury.



Rys. 7. Produkt IR 10.8 enh z nałożoną sztuczną paletą barwną dla temperatur najniższych (najwyżej wypiętrzonych wierzchołków chmur) od  $-33^{\circ}\text{C}$  do  $-73^{\circ}\text{C}$  (tzw. paleta M. Setvaka)

Rys. 8. Produkt typu Sandwich – połączenie obrazu HRV z obrazem IR 10.8 enh (w paletce M. Setvaka)

Produkt IR 10.8 enh – wykorzystujący skalibrowane funkcją temperatury dane z kanału IR  $10,8\ \mu\text{m}$  satelity Meteosat 9 i Meteosat 8 (Rapid Scan), dzięki sztucznej paletce barwną dla temperatur najniższych (najwyżej wypiętrzonych wierzchołków chmur) pozwala na jakościową, szybką ocenę zagrożenia – wysokich, zimnych chmur. Jednocześnie wyróżnione wartości od  $-33$  (kolor niebieski) do  $-73^{\circ}\text{C}$  (kolor ciemnoczerwony) określają chmurę zbudowaną tylko z kryształków lodu (bez przechłodzonych kropelek wody). W przedstawionym przypadku (rys. 7) z 20.07.2007 temperatura wierzchołków chmury osiągnęła  $-65^{\circ}\text{C}$ . Rozkład tempe-



ratury przyjmuje charakterystyczny kształt V świadczący o występowaniu bardzo silnej konwekcji, rozbudowanej komórce Cb i związanych z tym groźnych zjawiskach (w tym wypadku – trąby powietrznej, gradu i gwałtownych opadów).

Na podstawie przygotowanych ciągów danych przeanalizowano m.in. rozkład wartości temperatury wierzchołków chmur burzowych (dla których występują wyładowania). Pozwoliło to określić najniższą temperaturę wierzchołków chmur notowaną w Polsce. Najniższą temperaturę zanotowano w maju i wynosiła  $-72^{\circ}\text{C}$ , najcieplejsze chmury burzowe występowały w październiku, a więc pod koniec sezonu burzowego. Minimalna temperatura wierzchołków chmur burzowych dla tego miesiąca wynosiła  $-60^{\circ}\text{C}$ . Dane te różnią się od podawanych w literaturze amerykańskiej (m.in. podstawowym wyróżnikiem rozwijających się *Overshooting Tops* wg ich algorytmu jest przekroczenie temperatury  $-82^{\circ}\text{C}$ ). Choć w USA są opracowane rozwinięte metody automatycznej/obiektywnej analizy warunków prowadzących do rozwoju groźnej konwekcji, wskazana byłaby ostrożność w bezpośredniej implementacji wyników (progów, klas) i metod rozwijanych w innych warunkach fizyczno-geograficznych.

#### 2.1.5. Wykorzystanie produktów satelitarnych w całym procesie konwekcyjno-burzowym na przykładzie systemu NWC-SAF

Poniżej opisano wybrane produkty SAFNWC, które mogą być wykorzystywane w różnych fazach rozwoju konwekcji:

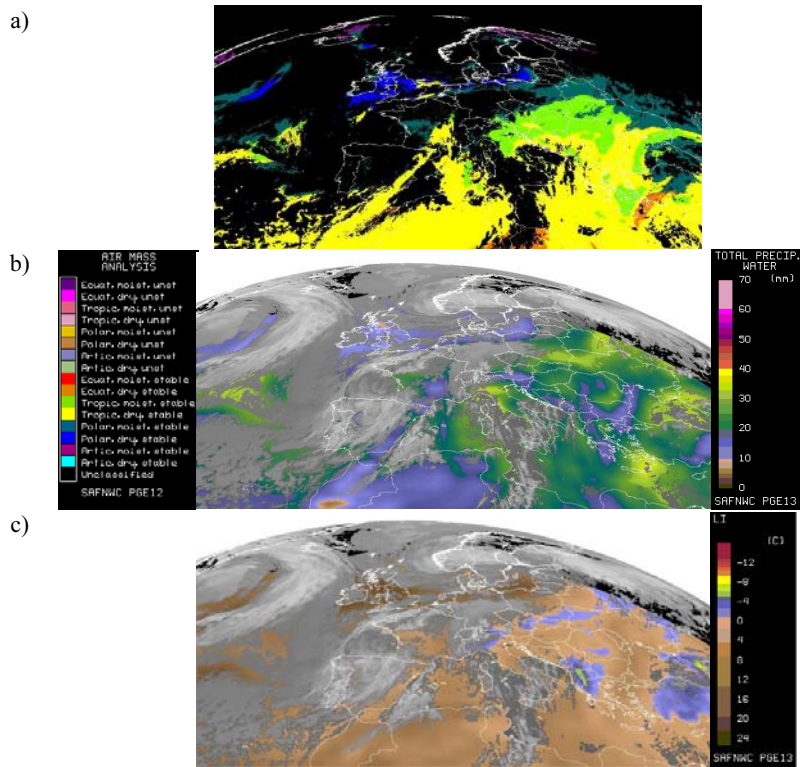
- TPW (*Total Precipitable Water*) – ilość pary wodnej w słupie powietrza (w polskiej terminologii meteorologicznej jest stosowany termin „woda opadowa”; zgodnie z definicją ilość wody wyrażona w mm powstała w wyniku skroplenia całej pary wodnej w słupie atmosfery o jednostkowym przekroju). Produkt ten może być wykorzystywany do oceny stabilności atmosfery i możliwości wystąpienia burz oraz szacowania ich intensywności. Produkt TPW, podobnie jak LPW i SAI, jest obliczany dla niezachmurzonych punktów obrazu satelitarnego metodami sieci neuronowych na podstawie wielospektralnych danych SEVIRI i bazy informacji radiosondażowych ECMWF.
- LPW (*Layer Precipitable Water*) – ilość pary wodnej w trzech warstwach troposfery. Szczególnie interesująca jest możliwość detekcji sytuacji sprzyjających wystąpieniu groźnych burz, np. duży poziomy gradient wilgotności czy pojawienie się warstwy suchej ponad warstwą bardzo wilgotną. Troposferę podzielono na trzy warstwy zdefiniowane w następujący sposób:
  - BL (*Boundary Layer* - warstwa graniczna) – 1013-840 hPa,
  - ML (*Middle Layer* – warstwa średnia) – 840-437 hPa,
  - HL (*High Layer* – warstwa wysoka) – 437 hPa – top.Produkt LPW jest obliczany dla niezachmurzonych punktów obrazu satelitarnego metodą sieci neuronowych.
- SAI (*Stability Analysis Imagery*) – wskaźnik stabilności troposfery (*Lifted Index*). Wartości ujemne wskazują niestabilne obszary (kolory czerwone i żółte), dodatnie wartości odpowiednio stabilne (kolory niebieskie i brązowe).

- AMA (*Air Mass Analysis*) – klasyfikacja mas powietrza w zależności od wilgotności (sucha, normalna, wilgotna) i pochodzenia (arktyczna, polarna, zwrotnikowa, równikowa).
- CT (*Cloud Type*) – klasyfikacja typu zachmurzenia na chmury bardzo wysokie, wysokie, średnie, niskie, bardzo niskie, chmury grube i cienkie, przeprowadzana metodami progowymi. Produkt CT jest pomocny przy analizie rodzaju zachmurzenia i śledzeniu rozwoju chmur konwekcyjnych, szczególnie w warunkach nocnych lub gdy jest potrzebna szybka ocena sytuacji.
- CTTH (*Cloud Top Temperature and Height*) – temperatura i wysokość wierzchołków chmur, wysokość może być wyrażona w jednostkach ciśnienia i w kilometrach. Głównym zadaniem tego produktu jest ostrzeżenie przed rozwojem konwekcji oraz jej monitorowanie.
- CRR (*Convective Rainfall Rate*) – intensywność opadu z chmur konwekcyjnych. Głównym zadaniem tego produktu jest identyfikacja systemów konwekcyjnych i monitorowanie intensywności opadu.
- Nowy produkt, PGE13 SPhR (*SEVIRI Physical Retrieval*) zawiera parametry wilgotności atmosfery i indeksy stabilności wyznaczone na podstawie satelitarnych danych MSG SEVIRI. Algorytm wyznaczania pionowych profili temperatury i wilgotności atmosfery na podstawie satelitarnego pomiaru promieniowania w podczerwieni wykorzystuje metody fizyczne (iteracyjne podejście, z danymi NWP jako pierwsze przybliżenie) w odróżnieniu od stosowanych w starszej wersji algorytmów statystycznych gdzie wykorzystywane są sieci neuronowe. W ramach tego produktu dostępne są wskaźniki stabilności powietrza: *Lifted Index*, *K-Index* i *Showalter Index*.

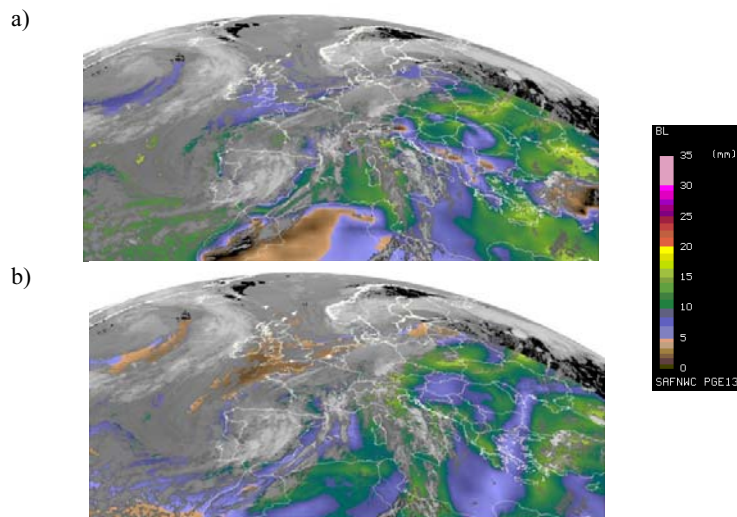
Aby zilustrować zastosowanie opracowanych metod do prognozowania i monitorowania niebezpiecznych zjawisk meteorologicznych, których częstość występowania i intensywność jest związana ze zmiennością klimatu, przedstawiono analizę sytuacji meteorologicznej dla dnia 12 czerwca 2010 charakteryzującego się dużą aktywnością burzową. Tego dnia nad Polską przemieszczał się front chłodny, w upalnym powietrzu zwrotnikowym przed frontem tworzyły się niezwykle gwałtowne burze, intensywne zwłaszcza w Małopolsce. Duży kontrast termiczny rozdzielonych frontem mas powietrza powodował wysokie natężenie zjawisk konwekcyjnych, występowały liczne burze, nawałnice, trąby powietrzne, z bardzo silnymi opadami deszczu i gradu i wyładowaniami atmosferycznymi. Najgwałtowniejsze były burze nad południową i wschodnią częścią województwa świętokrzyskiego. Pierwsze chmury konwekcyjne pojawiły się o godz. 14:15 UTC na wschodzie Kotliny Kłodzkiej i przemieszczały się na północny wschód. Bardzo duży system konwekcyjny zaczął się rozwijać ok. godz. 15:30 UTC w okolicy Krakowa, a pełny rozwój osiągnął ok. 17:30 UTC nad województwem świętokrzyskim.

Już o godz. 06:00 UTC (rys. 9) na produkcie TPW można zaobserwować dużą (powyżej 30 mm) wilgotność troposfery, LI ma wartości ujemne do  $-2^{\circ}\text{C}$ . Na produkcie AMA masa powietrza nad pld. Polską została sklasyfikowana jako tropikalna – wilgotna – stabilna. Pozostałe indeksy stabilności nie wskazują na możliwość

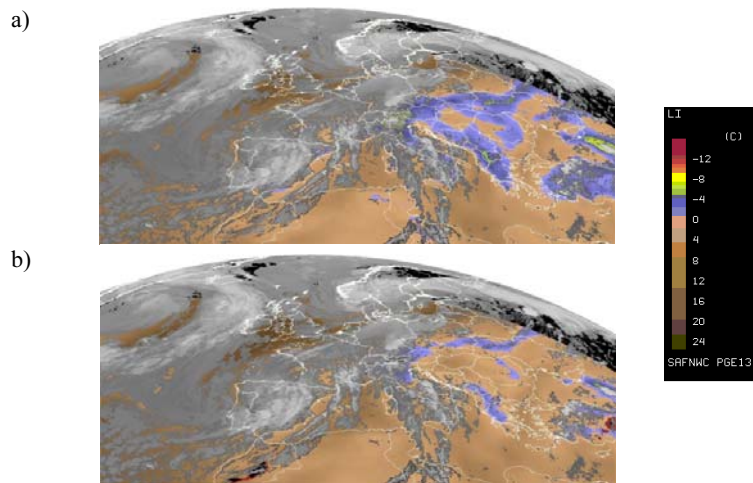
pojawienia się konwekcji. Showalter Index zaczyna sygnalizować niestabilność w okolicy Kotliny Kłodzkiej o godz. 10:00 UTC przyjmując ujemne wartości.



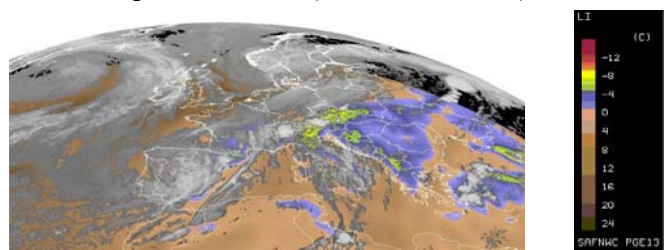
Rys. 9. 2010-06-12 godz.06:00 UTC: a) AMA – Air Mass Analysis; b) TPW – Total Precipitable Water; c) LI – Lifted Index



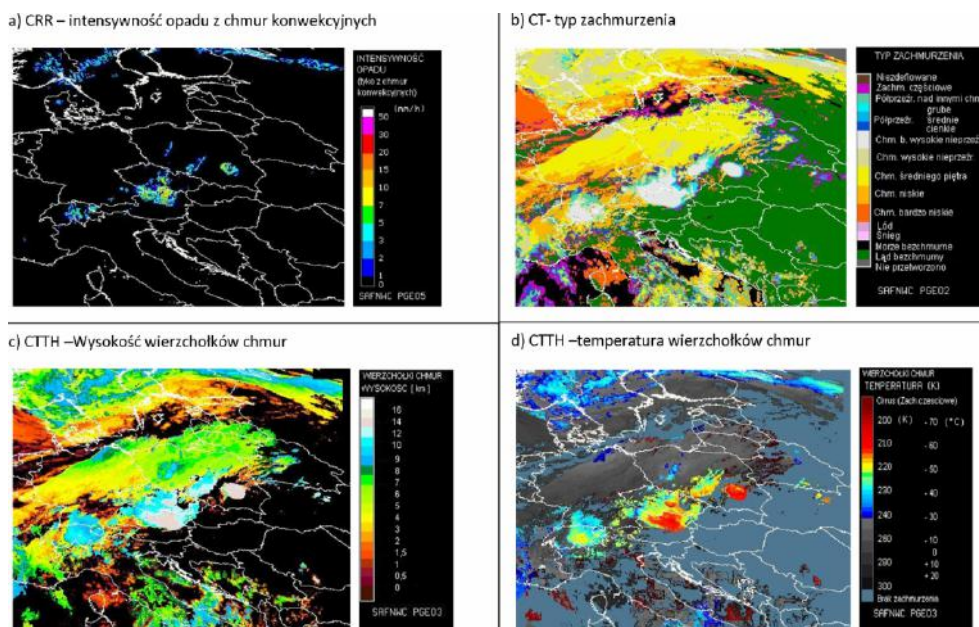
Rys. 10. 2010-06-12 godz.12:00 UTC Layer Precipitable Water: a) BL – Boundary Layer; b) ML – Middle Layer



Rys. 11. 2010-06-12 godz.12:00 UTC: a) LI – Lifted Index, b) Showalter Index



Rys. 12. 2010-06-12 godz.15:00 UTC. LI – Lifted Index



Rys. 13. Rozwinięta konwekcja 2010.06.12 godz.17:00 UTC.

Na produktach z godz. 12:00 UTC (rys. 11 i 12) niestabilność obserwujemy na Lifted Index i Showalter Index (wartości od 0 do  $-4^{\circ}\text{C}$ ), oraz na produkcie LPW – Layer Precipitable Water (rys. 10), gdzie dużą wilgotność można zaobserwować w warstwie granicznej (BL) i średniej (ML). O godz. 15:00 UTC (rys. 12) wartości wskazujące na pogłębiającą się niestabilność (do  $-8^{\circ}\text{C}$ ) przyjmuje Lifted Index.

Możliwości monitorowania dalszego rozwoju sytuacji z wykorzystaniem produktów satelitarnych przedstawia rys. 13. Przedstawiono intensywność opadu (produkt CRR), sklasyfikowane wysoko wypiętrzone komórki burzowe (produkt CT) sięgające do ok. 12-14 km (produkt CTTH – wysokość), o temperaturze wierzchołków poniżej  $-60^{\circ}\text{C}$  (produkt CTTH – temperatura).

#### 2.1.6. Wspólne wykorzystanie danych satelitarnych oraz informacji o wyładowaniach atmosferycznych w monitoringu zjawisk burzowych

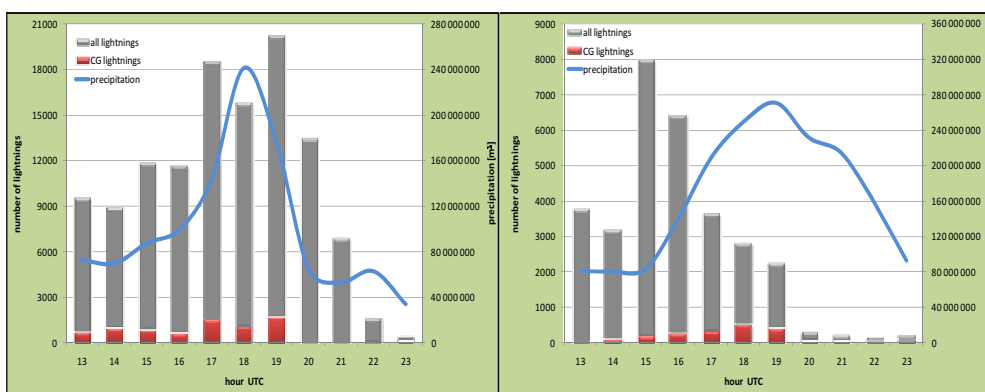
Wykorzystanie danych z systemu detekcji i rejestracji wyładowań atmosferycznych PERUN w połączeniu z dostępnymi produktami satelitarnymi, pozwala na lepsze wspomaganie prognozowania i monitorowania zjawisk burzowych.

Aby to zobrazować, wyselekcjonowano dwa przypadki do analizy zależności między konwekcyjnym opadem płynnym a aktywnością elektryczną atmosfery. Te przypadki to komórki konwekcyjne obserwowane nad Polską w dniach 21.08.2007 oraz 11.05.2009. Korzystając z rekordów opadowych, zanotowanych dla tych dni przez deszczomierze automatyczne pracujące w sieci telemetrycznej IMGW, skumulowano 10-minutowe składowe opadowe do wartości godzinnych filtrując i usuwając jednocześnie wszelkie informacje o opadzie nie dotyczące analizowanych komórek burzowych. Jednocześnie, wykorzystując technologie GIS i korzystając z tekstowych danych wtórnych systemu PERUN, sporządzono mapy gęstości (liczba wyładowań atmosferycznych na  $1\text{ km}^2$ ) oraz lokalizacji wyładowań atmosferycznych dla Polski w tym samym kroku godzinnym, dla którego uprzednio przygotowano mapy opadu. Na rysunku 14 przedstawiono rozkłady liczby dyskryminowanych wyładowań atmosferycznych oraz towarzyszące im wartości opadu.

Histogramy wyładowań prezentują typową zależność ilościową między wyładowaniami doziemnymi (CG – wliczane są tu zarówno wyładowania o polaryzacji „+” jak i „-”) a międzymurowymi (IC). Jakkolwiek seria czasowa jest zbyt krótka i uboga, by pokusić się o daleko idące wnioski, jednak korelacja między przebiegiem opadu a jednoczesną liczbą zanotowanych wyładowań doziemnych pozostaje w obydwu przypadkach znacząca. Krzywa opadu nawiązuje przebiegiem do liczby wyładowań doziemnych pozostając w luźnym związku z wyładowaniami międzymurowymi (taki wniosek znajduje się także we wcześniejszych obserwacjach tego typu na świecie). Maksima liczby wyładowań występują odpowiednio o godz. 19:00 UTC i 16:00 UTC. W pierwszym przypadku zmienność czasowa liczby wyładowań zarówno CG, jak i IC ma rozkład zbliżony do normalnego.

Niespodziewany spadek liczby wyładowań 21.08.2007 o godz. 18:00 UTC – rozbieżny z krzywą opadu – jest związany z przekraczaniem przez komórkę bu-

rzową dużego zbiornika wodnego przy zaporze we Włocławku (prawie 60 km<sup>2</sup> powierzchni wodnej), który to w miesiącach letnich działa ochładzająco na atmosferę w przygruntowej warstwie tarcia, odcinając rdzeń konwekcyjny komórki od alimentacji oddawanego przez grunt ciepła. Dochodzi wtedy do gwałtownego spadku liczby wyładowań w rdzeniu burzy, co nie ma jednak wpływu na wielkość opadu w tym samym czasie. W drugim przypadku krzywa opadu jest przesunięta względem histogramu wyładowań doziemnych i odzwierciedla opóźnienie opadu względem wyładowań o około 1 godzinę. Słupki wyładowań międzychmurowych względem opadu w tym przypadku cechuje aż 3-godzinne przesunięcie. Tłumaczyć to można cechami charakterystycznymi burz wiosennych, których przebieg i rozkład wyładowań jest inny niż burz letnich.



Rys. 14. Zmienność czasowa opadu atmosferycznego oraz odpowiadającej mu aktywności elektrycznej atmosfery dla burzy z dnia 21.08.2007 (po lewej) i 11.05.2009 (po prawej). Linia niebieska odpowiada opadowi zmierzonemu jako suma obszarowa z całej powierzchni opadowej pod komórką burzową w zadanym przedziale czasowym, a słupki – dyskryminowanym wartościom liczby wyładowań doziemnych (czerwony) i międzychmurowych (szary)

## 2.2. Mgła i chmury niskie stratus

Mgła, zjawisko meteorologiczne z grupy hydrometeorów, jest jednym z najczęściej występujących powodów ograniczenia widzialności. Jest to zawiesina bardzo małych kropelek wody lub kryształków lodu w przyziemnej warstwie powietrza, zmniejszająca widzialność w kierunku poziomym poniżej 1 km [Niedźwiedz 2003]. Natomiast przy widzialności 1-10 km występuje zamglenie. Istnieje wiele typów mgły różniących się w zależności od mechanizmu powstania, lokalizacji geograficznej, masy powietrza, charakterystyki aerozoli, pory roku, pory dnia, mikrofizycznych własności czy ewolucji w czasie. Chociaż klasyfikacje mgły wymieniają około 15 typów, to ze względu na fizyczny proces powstawania można wymienić trzy główne mechanizmy: ochładzanie się powietrza aż do temperatury punktu rosy (radiacyjna); napływ wilgoci do danej porcji powietrza (frontalna); przemieszczanie się cieplej masy powietrza nad chłodniejsze podłoże (adwekcyjna). Ograniczenie widzialności jest często wynikiem inwersji temperatury, pod warstwą inwersyjną mogą się gromadzić pyły czy aerozole, które stanowią jądra



kondensacji, na których powstają mgły i niskie chmury stratus. Oba te zjawiska są przyczyną ograniczenia widzialności i stanowią duże zagrożenie dla ruchu drogowego i lotniczego. Prognozowanie i monitorowanie występowania warunków sprzyjających ograniczeniu widzialności jest zatem istotnym elementem systemu ostrzegania przed groźnymi zjawiskami meteorologicznymi.

Dane satelitarne mogą stanowić ważny element takiego systemu, jednak detekcja mgły i niskich chmur stratus na podstawie danych satelitarnych nie jest zadaniem łatwym. Systemy satelitarne dostarczają wielu cennych informacji o fizycznych właściwościach chmur takich, jak temperatura wierzchołków, stan skupienia cząstek i ich wielkość, mimo to nie zawsze jest możliwa jednoznaczna identyfikacja mgły, ponieważ trudno ją odróżnić od podłoża oraz innych chmur. Dodatkowym utrudnieniem w detekcji mgły i niskich chmur stratus jest występujące ponad nimi zachmurzenie. Dlatego też identyfikacja sytuacji z ograniczoną widzialnością na obrazach satelitarnych jest możliwa jedynie wówczas, gdy nie występują chmury średniego i wysokiego piętra.

Najwięcej informacji o chmurach można uzyskać na podstawie analizy danych z satelity geostacjonarnego MSG (METEOSAT Second Generation) mierzącego promieniowanie w dwunastu kanałach, w widzialnym i podczerwonym zakresie spektralnym, z częstotliwością 15 minut i zdolnością rozdzielczą około 6 km dla obszaru Polski (3 km dla kanału HRVIS). Dane z satelitarnych radiometrów sondujących ATOVS i IASI, umieszczonych na satelitach okołobiegunowych NOAA i METOP również mogą być wykorzystywane do oceny wilgotności warstwy atmosfery przy powierzchni Ziemi, jednak ich jakość oraz zdolność rozdzielcza przestrzenna i czasowa są niewystarczające do monitoringu krótkotrwałych zjawisk o charakterze lokalnym.

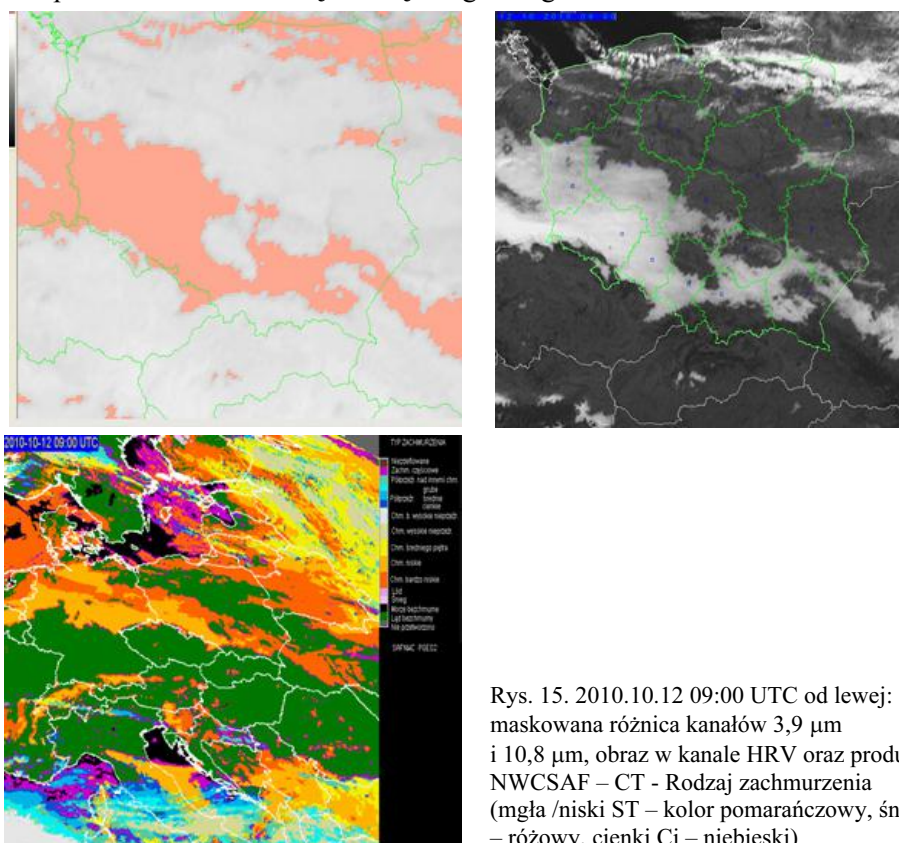
Tab. 2. Algorytmy identyfikacji mgły i niskich chmur stratus na podstawie danych satelitarnych

PARAMETRY METEOROLOGICZNE istotne przy diagnozie i prognozie zjawiska	Algorytmy detekcji mgły lub chmur stratus na podstawie danych satelitarnych
<ul style="list-style-type: none"> <li>- profil temperatury</li> <li>- profil temperatury punktu rosy</li> <li>- spadek temperatury (w czasie)</li> <li>- ciśnienie / gradient ciśnienia</li> <li>- prędkość wiatru przy pow. ziemi</li> <li>- topografia</li> <li>- roślinność</li> <li>- aerozole</li> </ul>	<p>Metody progowe stosowane dla kombinacji kanałów MSG / SEVIRI:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Różnica temp. radiacyjnych w kanałach: (IR 3.9 - IR 10.8)</li> <li>2. Różnica temp. radiacyjnych w kanałach: (IR 8.7 - IR 10.8)</li> <li>3. Produkt SAFNWC CT- CloudType- Klasyfikacja chmur (progi stosowane do kanałów: VIS0.6, IR1.6, IR3.9, WV7.3, IR8.7, IR10.8, IR12.0 <math>\mu</math>m)</li> </ol> <p>Kompozycje barwne RGB tworzone z wielospektralnych danych MSG/SEVIRI:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kompozycja: (IR8.7 - IR13.3) / (IR12.0 - IR10.8) / IR10.8</li> <li>2. Rozpoznanie mgły/St nad śniegiem w warunkach dziennych, kompozycja: IR1.6 / HRV0.6 / HRV0.6</li> </ol> <p>Rekomendowane przez EUMETSAT kompozycje barwne RGB tworzone z wielospektralnych danych MSG / SEVIRI:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Day Natural Colour NIR1.6 / VIS0.8 / VIS0.6</li> <li>2. Day Microphysics VIS0.8 / IR3.9 reflected / IR10.8</li> <li>4. Night Microphysics (IR12.8 - IR10.8) / (IR10.8 - IR3.9) / IR10.8</li> <li>3. 24 h Microphysics/Dust (IR12.8 - IR10.8) / (IR10.8 - IR 8.7) / IR10.8</li> </ol>
DANE	
Dane MSG / SEVIRI Sondáže satelitarne: ATOVS / NOAA, METOP IASI / METOP Modele NWP Dane SYNOP	
OPROGRAMOWANIE	
2met SUMO SAFNWC AAPP, IAPP	

Pomimo trudności w rozpoznawaniu mgły i niskich chmur stratus na obrazach satelitarnych, istnieje cały szereg algorytmów pozwalających na ich detekcję. W tabeli 1 w sposób sumaryczny przedstawiono stosowane algorytmy, dane satelitarne i dane naziemne oraz pakiety oprogramowania wykorzystywane przy identyfikacji mgły i niskich chmur stratus.

Najlepiej sprawdzają się algorytmy progowe, analizujące dane z wielu kanałów spektralnych, gdzie każdemu obiektowi przypisano zakresy wartości, zależne od pory dnia, pory roku i regionu Ziemi. Przykładem zastosowania metody progowej jest produkt SAFNWC CT (CloudType) – klasyfikacja typu zachmurzenia na podstawie danych MSG, gdzie mgła i stratus stanowią jedną klasę, „Chmury bardzo niskie”. Produkt CT jest wykorzystywany w biurach prognoz szczególnie w porze nocnej, gdy informacje z kanałów widzialnych są niedostępne i ocena sytuacji tylko na podstawie danych z podczerwieni jest trudna. Podobną trudność sprawiają przypadki występowania mgły o świcie i zmierzchu, kiedy to zmieniają się właściwości spektralne kanałów w bliskiej podczerwieni (3,9  $\mu\text{m}$ ) wykorzystywanych do detekcji mgły i niskich chmur stratus.

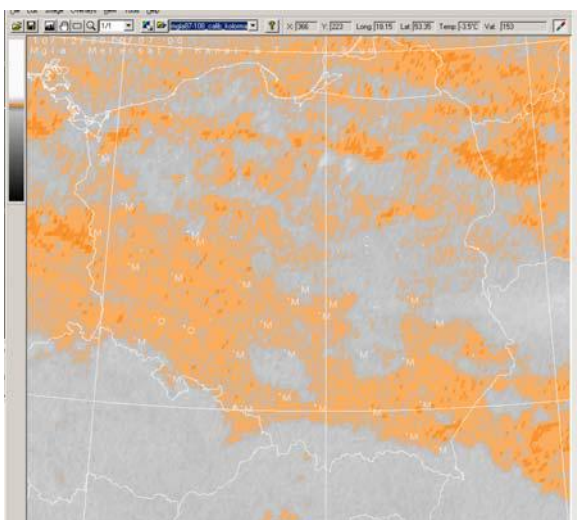
Na rysunkach 15 i 16 przedstawiono przykłady stosowania metod progowych detekcji mgły i niskich chmur stratus dla przypadku z 12 października 2010, kiedy to nad południowo-zachodnią Polską zalegała mgła.



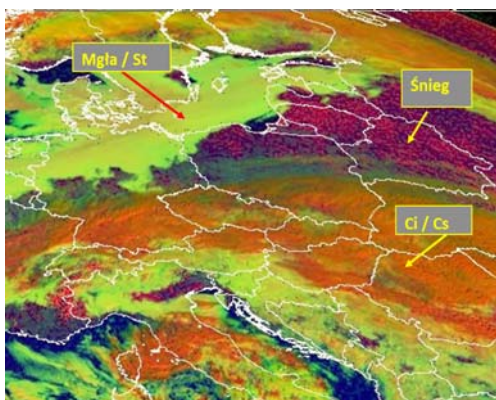
Rys. 15. 2010.10.12 09:00 UTC od lewej: maskowana różnica kanałów 3,9  $\mu\text{m}$  i 10,8  $\mu\text{m}$ , obraz w kanale HRV oraz produkt NWCSAF – CT - Rodzaj zachmurzenia (mgła /niski ST – kolor pomarańczowy, śnieg – różowy, cienki Ci – niebieski)



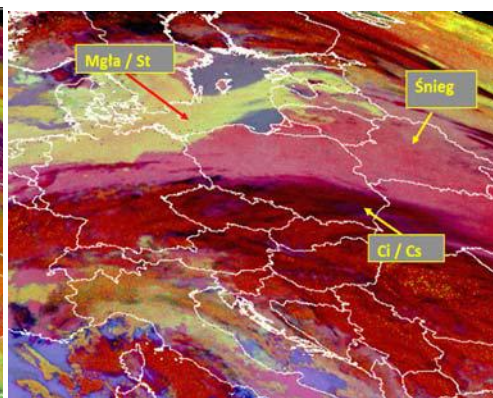
Kolejną grupę algorytmów do identyfikacji mgły i niskich chmur stratus stanowią tzw. kompozycje barwne RGB – obrazy, w których informacja z trzech zakresów spektralnych jest połączona w następujący sposób: składową czerwoną (Red) stanowi jeden kanał, składową zieloną (Green) – inny i niebieską (Blue) trzeci kanał. Oczywiście 12 kanałów spektralnych może być łączonych na wiele sposobów w jedną kompozycję RGB. Ponadto, zamiast pojedynczego kanału można w kompozycji RGB wykorzystać również różnicę kanałów. Przy doborze kanałów tworzących kompozycję bierze się pod uwagę informacje, jakie można uzyskać, np. różnica temperatur radiacyjnych (BTD – *Brightness Temperature Difference*) w kanałach (IR12.0-IR10.8) jest dobrym wskaźnikiem występowania kryształków lodu w wierzchołkach chmur. Aby zwiększyć czułość algorytmu na bardzo subtelne różnice wartości, w kompozycjach określa się ponadto zakresy wartości.



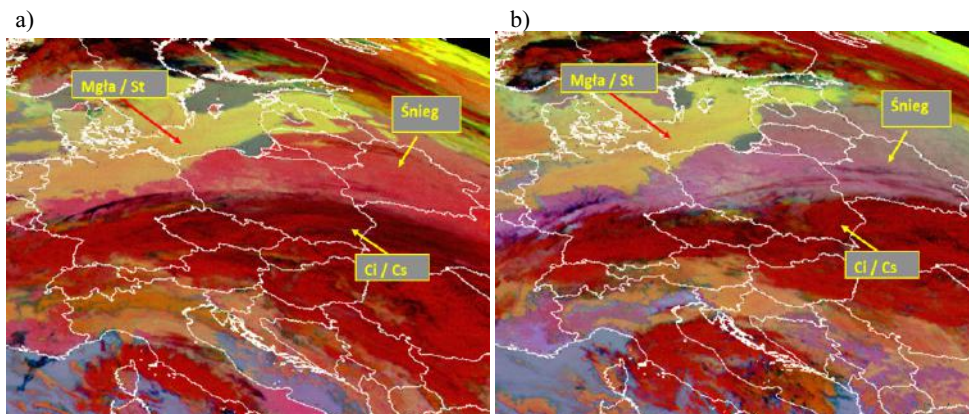
Rys. 16. 12.10.2010 07:00 UTC różnica kanałów  $8,7 \mu\text{m} - 10,8 \mu\text{m}$  z nałożonymi danymi z sieci naziemnej. Kropka oznacza lokalizację stacji. Litera M przy stacji – zaobserwowano mgłę (ww = 0-49), litera O – zaobserwowano opad na stacji (ww = 50-100) przy widzialności  $\leq 1 \text{ km}$



Rys. 17. Mikrofizyczna kompozycja barwna RGB ( $0,8 \mu\text{m} / 3,9 \mu\text{m}$  inverted /  $10,8 \mu\text{m}$ ) – dzienna, 11.03.2010, 09:00 UTC



Rys. 18. Mikrofizyczna kompozycja barwna RGB ( $12,8 \mu\text{m} - 10,8 \mu\text{m}$ ) /  $10,8 \mu\text{m} - 3,9 \mu\text{m}$  /  $10,8 \mu\text{m}$ ) – nocna, 11.03.2010, 00:00 UTC



Rys. 19. Mikrofizyczna kompozycja barwna RGB ( $12,8 \mu\text{m} - 10,8 \mu\text{m}$ ) /  $10,8 \mu\text{m} - 8,7 \mu\text{m}$  /  $10,8 \mu\text{m}$  – 24 godzinna, 11.03.2010, 03:00 UTC (a), 12:00 UTC (b)

Interpretacja uzyskanego obrazu wymaga pewnego doświadczenia, gdyż kompozycja RGB zmienia się w zależności od pory dnia, pory roku i regionu i jest to informacja jakościowa (to znaczy, że niestety nie nadaje się do numerycznej analizy czy przetwarzania).

Na rys. 17-19 przedstawiono przykłady zastosowania kompozycji RGB do detekcji mgły i niskich chmur stratus dla 11 marca 2011, kiedy to nad Morzem Bałtyckim, Danią, Północnymi Niemcami oraz Morzem Północnym zalegała mgła. Wszystkie prezentowane produkty pozwalają na rozróżnienie między mgłą lub niskimi chmurami stratus a śniegiem oraz chmurami lodowymi typu Cirrus.

### 2.3. Silny wiatr

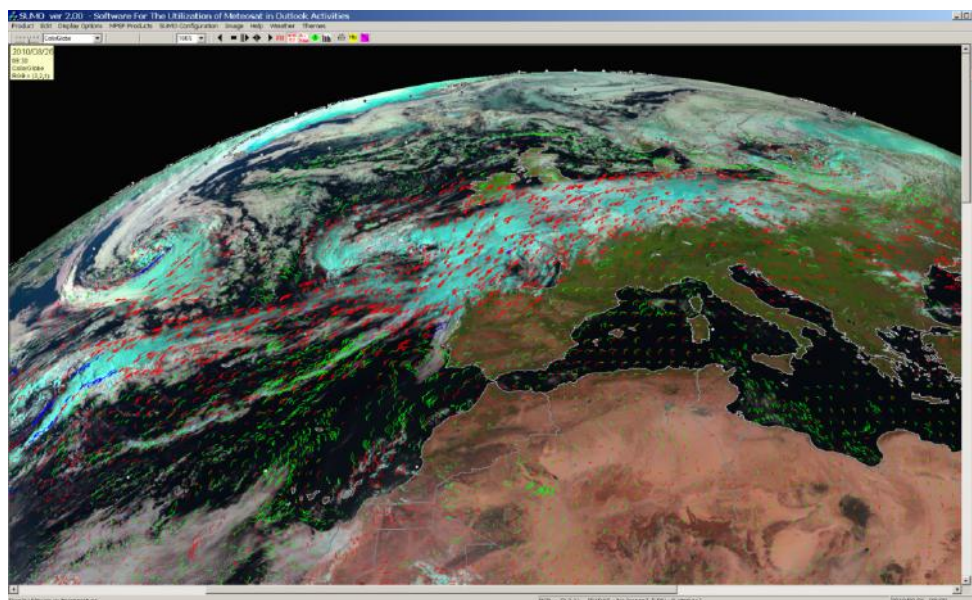
Kolejnym zjawiskiem atmosferycznym stwarzającym duże zagrożenie dla bezpieczeństwa cywilnego jest silny wiatr. Występowanie tego zjawiska może ulec nasileniu na skutek zmian klimatycznych, w tym głębszej penetracji ciepłych mas powietrza na średnie i wysokie szerokości geograficzne oraz wzrostu częstości zjawisk burzowych. Metody określania pola wiatru na podstawie danych satelitarnych są najczęściej metodami pośrednimi, w których pole wiatru na wybranych poziomach barycznych jest wyznaczane na podstawie pola geopotencjału lub kierunku i prędkości przemieszczających się chmur. Wyjątek stanowią tu metody pozwalające na określenie wiatru przy powierzchni morza na podstawie danych z aktywnego czujnika ASCAT. W tabeli 3 zamieszczono wykaz istotnych dla określania pola wiatru parametrów meteorologicznych, danych oraz algorytmów wraz z zastosowanym oprogramowaniem opracowany na potrzeby Projektu KLIMAT.

Metody najczęściej stosowane do wyznaczania pola wiatru z danych satelitarnych wykorzystują analizę przemieszczających się systemów chmurowych na kolejnych obrazach satelitarnych geostacjonarnych satelitów meteorologicznych, które dostarczają danych z dużą rozdzielczością czasową (15 minut). Wśród produktów wykorzystujących tę metodykę należy wymienić MPEF AMV (*Atmospheric Motion Vector*) oraz SAFNWC HRW (*High Resolution Wind*). Oba te produkty

wykorzystują analizę przemieszczania zachmurzenia na kolejnych obrazach satelitarnych METEOSAT/SEVIRI, a różnice polegają na stosowanych algorytmach i pomocniczych danych NWP oraz miejscu tworzenia produktu. Produkt MPEF AMV jest obliczany w EUMETSAT-cie z wykorzystaniem danych z modelu prognozy ECMWF, natomiast produkt SAFNWC HRW powstaje w Ośrodku Teledetekcji Satelitarnej IMGW-PIB OKk z zastosowaniem danych z modelu NWP GFS.

Tab. 3. Algorytmy przeznaczone do diagnozy sytuacji związanych z dużą siłą wiatru na morzu i na lądzie na podstawie danych satelitarnych

PARAMETRY METEOROLOGICZNE istotne przy diagnozie zjawiska	Algorytmy wyznaczania prędkości wiatru na podstawie danych satelitarnych
- pole baryczne (pole geopotencjału)	<b>Produkt MPEF AMV</b> (Atmospheric Motion Vector) pole wektorowe obrazujące przemieszczanie zachmurzenia na podstawie danych MSG/SEVIRI
DANE	<b>Produkt SAFNWC HRW</b> (High Resolution Wind) Atmospheric Motion Vector obliczany za pomocą pakietu SAFNWC w Ośrodku Teledetekcji Satelitarnej
Dane MSG / SEVIRI Sondaże satelitarne: ATOVS / NOAA, METOP IASI / METOP Model NWP Dane SYNOP	<b>Wiatr geostroficzny</b> wyznaczany na podstawie sondażu satelitarnego ATOVS / NOAA
OPROGRAMOWANIE	Pole wiatru na powierzchni morza na podstawie danych <b>ASCAT/METOP</b>
2met SUMO SAFNWC AAPP, IAPP	<b>Kompozycje barwne „Airmass RGB”</b> do identyfikacji położenia prądów strumieniowych

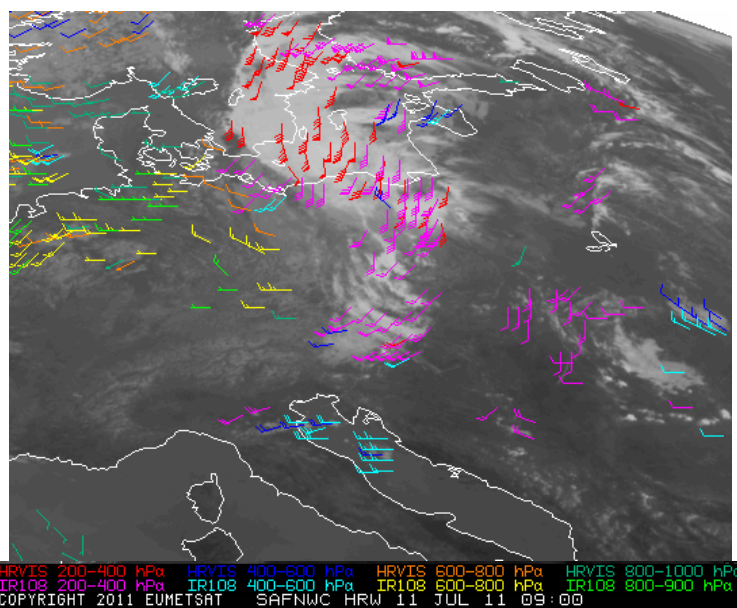


Rys. 20. Przykładowy produkt AMV nałożony na kompozycję barwną RGB (1,6  $\mu\text{m}$ /0,8  $\mu\text{m}$ /0,6  $\mu\text{m}$ ), kolory symboli oznaczają poziom baryczny: 0-200 hPa – niebieskie, 200-500 hPa – czerwone, 500-1050 hPa – zielone



Produkt MPEF AMV zawiera informację o kierunku i prędkości przemieszczania się obiektów wykrytych w atmosferze wraz z ich wysokością podawaną w jednostkach ciśnienia. Wysokość jest określana na podstawie temperatury oraz aktualnego profilu z NWP dla danej lokalizacji. Do detekcji obiektów wykorzystuje się 5 kanałów radiometru METEOSAT/SEVIRI: widzialny 0,8  $\mu\text{m}$ , pary wodnej 6,2 i 7,3  $\mu\text{m}$ , w podczerwieni termalnej 10,8  $\mu\text{m}$  oraz kanał widzialny wysokiej rozdzielczości HRV. Wektory ruchu są odtwarzane na podstawie śledzenia przemieszczania się chmur oraz koncentracji pary wodnej. Na rysunku 20 przedstawiono przykładowe pole wiatru dla 26.08.2010, 09:30 UTC.

Z kolei produkt SAFNWC HRW będący wektorowym polem wiatru w czterech warstwach troposfery jest generowany na podstawie analizy przemieszczania się chmur na kolejnych obrazach satelitarnych SEVIRI z kanału HRVIS w porze dziennej i kanału podczerwonego IR 10.8 w nocy. Algorytm HRW opracowano i oprogramowano w Hiszpańskim Instytucie Meteorologicznym AEMET w ramach projektu NWC SAF – *Eumetsat Satellite Application Facility to Nowcasting and Veryshortrange Forecasting*. Produkt HRW, oprócz kierunku i prędkości wiatru zawiera takie informacje jak temperatura i ciśnienie, typ/rodzaj chmury (SAFNWC Cloud Type) skorelowanej z wektorem wiatru oraz statystyczny wskaźnik jakości. Przykładowy produkt HRW pokazano na rys. 21.



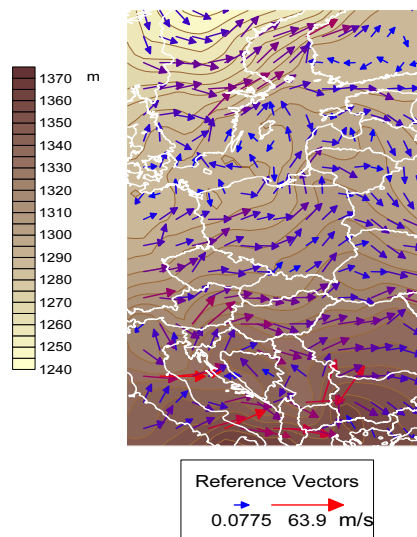
Rys. 21. Przykładowy produkt HRW – pole wiatru na różnych poziomach  
 200-400 hPa – kolor czerwony i różowy, 400-600 hPa – kolor ciemno- i jasnoniebieski,  
 600-800 hPa – kolor pomarańczowy i żółty, 800-1000 hPa – kolor ciemno- i jasnozielony

Głównym ograniczeniem produktów tworzonych na podstawie analizy przemieszczających się chmur jest ich zależność od zachmurzenia – produkty te nie są tworzone dla niezachmurzonych pikseli. W przypadku produktu AMV prędkość

i kierunek wiatru wyznaczone w poszczególnych pikselach mogą dotyczyć różnych poziomów barycznych odpowiadających wysokości wierzchołków chmur.

Ograniczeń tych nie mają algorytmy wykorzystujące dane z czujników sondujących ATOVS czy IASI znajdujących się na satelitach okołobiegunowych takich, jak NOAA czy Metop. Dane z tych czujników pozwalają na obliczanie pionowych profili temperatury i wilgotności, a następnie na ich podstawie wysokości geopotencjału dla wybranych poziomów barycznych. Prędkość i kierunek wiatru geostroficznego mogą być wyznaczone z wartości geopotencjału. Tak wyznaczone pole wiatru geostroficznego pokazano na rys. 22.

Wiatr geostroficzny jest stosunkowo bliski rzeczywistemu jedynie w swobodnej atmosferze, z tego też względu, dane NOAA/AOTVS nie mogą być wykorzystane do wyznaczania pola wiatru przy powierzchni Ziemi.

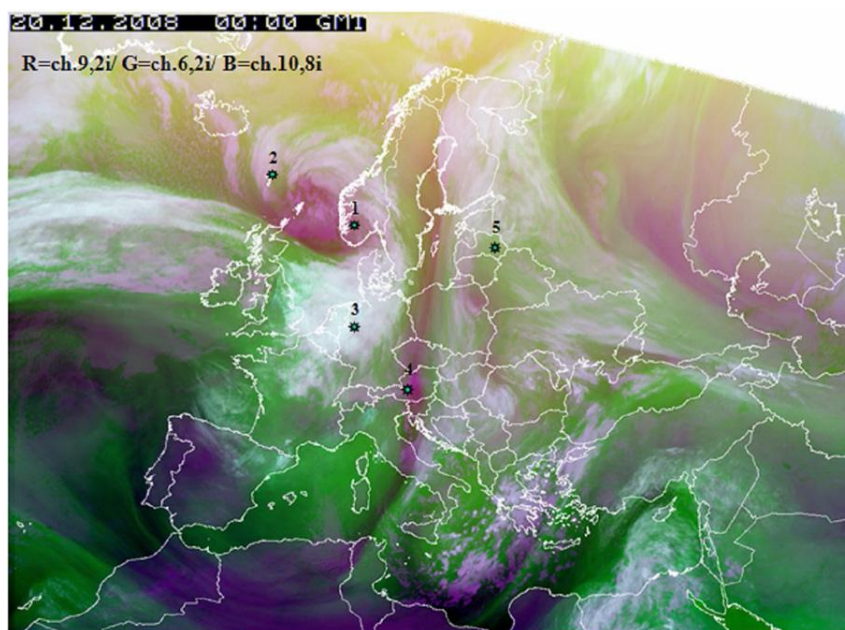


Rys. 22. Pole wiatru geostroficznego wyznaczone z danych NOAA/ATOVS

Innym produktem, przydatnym do wykrywania sytuacji powiązanych z dużą prędkością wiatru w górnej troposferze są kompozycje barwne RGB wykorzystujące kanał ozonowy  $9,7 \mu\text{m}$  oraz kanały pary wodnej i termiczny, takie jak Airmass RGB  $6,2\text{-}7,3 \mu\text{m}/9,7\text{-}10,8 \mu\text{m}/6,2 \mu\text{m}$  i kompozycja RGB  $9,7 \mu\text{m}/6,2 \mu\text{m}/10,8 \mu\text{m}$  inverted. Obie te kompozycje są pomocne przy identyfikacji położenia prądów strumieniowych oraz sytuacji związanych z obniżeniem tropopauzy i wlewami stratosferycznymi, które mogą być powiązane z silnym wiatrem. Należy zwrócić uwagę na to, że pierwsza z kompozycji pozwala na identyfikację sytuacji sprzyjających powstawaniu silnego wiatru w dolnej troposferze, a druga – w górnej.

Na rysunku 23 przedstawiono kompozycję RGB  $9,7 \mu\text{m}/6,2 \mu\text{m}/10,8 \mu\text{m}$  z 20.12.2008 i porównanie jej z danymi radiosondażowymi. Analiza przedstawionej sytuacji pokazuje, że tropopauza na stacjach 1, 2 i 4 znajdujących się w pobliżu jet streamu (kolor różowy) jest położona znacznie niżej (na wysokości ok. 350-300 hPa) niż na stacjach 3 i 5, gdzie lokuje się ona na wysokości 240-200 hPa. Osiedlające suche, prawdopodobnie bogate w ozon powietrze z rejonów dolnej stratosfe-

ry/górnej troposfery powoduje ugięcie tropopauzy i penetruje głęboko w troposferę, co może być interpretowane jako „wlew stratosferyczny” (*dry intrusion*). Potwierdzone jest to również przez zmierzony kierunek i prędkość wiatru (pomiar radiosondażowy) – szczególnie dla stacji Wiedeń (4), gdzie na granicy tropopauzy i powyżej występuje silny wiatr do 50 węzłów z kierunku północnego związany z wlewem, który w niższych warstwach słabnie i zmienia kierunek. Ten obszar koreluje z różowawym obszarem na obrazie RGB.



Rys. 23. Kompozycja barwna RGB 9,7  $\mu\text{m}$ /6,2  $\mu\text{m}$ /10,8  $\mu\text{m}$  z 20.12.2008, 00:00UTC  
Na obrazie zaznaczono pięć wybranych lokalizacji; na trzech z nich (1 – Stavanger, 2 – Torshavn i 4 – Wiedeń) zaobserwowano obniżenie tropopauzy oraz zanotowano silny wiatr, na pozostałych dwóch (3 – Essen, 5 – Velikie Luki) nie zaobserwowano tego zjawiska

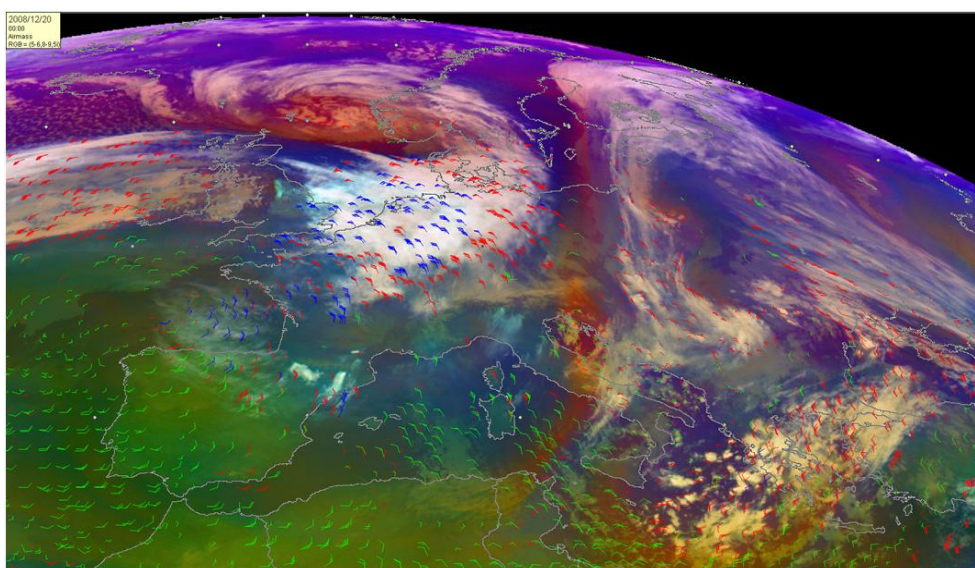
Druga z omawianych tu kompozycji barwnych została pokazana na rys. 24 z nałożonym produktem *Atmospheric Motion Vector* (AMV). Łatwo zauważyć pokrywanie się obszarów o różowym zabarwieniu charakteryzujących się obniżeniem tropopauzy na obu kompozycjach barwnych (rys. 23 i 24).

Wszystkie wymienione metody wykorzystują dane z satelitarnych czujników pasywnych mierzących promieniowanie odbite lub wyemitowane przez układ atmosfera-Ziemia.

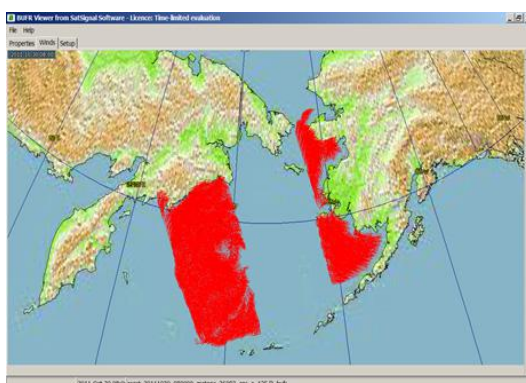
Inną kategorię czujników są czujniki aktywne, w tym skatterometr, który emituje promieniowanie, a następnie mierzy odbitą od powierzchni Ziemi składową. Obecnie dostępne są dane z dwóch przyrządów tego typu: ASCAT/METOP-A (satelita europejski EUMETSAT) oraz SCAT/OCEANSAT-2 (satelita indyjski). Są to aktywne radary stożkowo skanujące, pracujące w paśmie Ku (mikrofale). ASCAT/METOP-A skanuje dwa pasy o szerokości ok. 500 km oddalone od siebie o 700 km. Rozdzielczość przestrzenna wynosi 25 oraz 12,5 km. SCAT/OCEAN-2



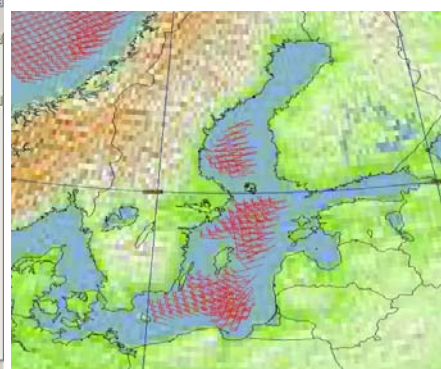
skanuje także dwa pasy: o szerokości 1400 i 1840 km z rozdzielczością 50 km. Rejestrowany odbity sygnał mikrofalowy jest uzależniony od drobnych zmarszczek na powierzchni wody związanych z chwilową prędkością i kierunkiem wiatru. Do odtwarzania pola wiatru na wysokości 10 m wykorzystywany jest model CMOD5 – Geophysical Model Function (GMF). Dane z czujników ASCAT mogą być wykorzystane do generowania pola wiatru jedynie nad powierzchnią wody, co istotnie ogranicza aplikacyjność tego produktu.



Rys. 24. Kompozycja barwna RGB Airmass (6,2 $\mu$ m-7,3 $\mu$ m / 9,7 $\mu$ m-10,8 $\mu$ m / 6,2 $\mu$ m) z nałożonymi wartościami pola wiatru z 20.12.2008, 00:00 UTC – Produkt AMV (*Atmospheric Motion Vector*) wygenerowany za pomocą oprogramowania SUMO  
Strzałki: niebieskie – warstwa atmosfery 0-200 hPa, czerwone – warstwa atmosfery 200-500 hPa, zielone – warstwa atmosfery 500-1050 hPa



Rys. 25. Przykładowy zasięg pomiaru pola wiatru dla 3-miutowego segmentu danych transmitowanych przez system EUMETcast



Rys. 26. Przykładowy produkt *pole wiatru na morzu* na podstawie danych ASCAT/METOP – 10.10.2011 orbity popołudniowe

Na rysunku 25 przedstawiono przykładowe pole wiatru dla 3-minutowego segmentu danych. Na potrzeby Projektu KLIMAT opracowano metodę generowania pola wiatru na Morzu Bałtyckim ze wszystkich odbieranych 3-minutowych segmentów. Ze względu na rozdzielczość radiometru dla pikseli bliskich brzegu nie jest określone pole wiatru. Również w przypadku pokrywy lodowej lub ciszy produkt jest niedostępny. Przykład tak wygenerowanego produktu dla Morza Bałtyckiego pokazano na rys. 26.

### **3. Podsumowanie**

Przedstawione produkty wykorzystujące dane z satelitów meteorologicznych pozwalają na detekcję obszarową oraz trójwymiarową zjawisk stanowiących zagrożenia, a w wybranych przypadkach również na ich ultrakrótkoterminową prognozę (nowcasting). Istotną cechą produktów satelitarnych jest ich dostępność w czasie rzeczywistym pozwalająca na śledzenie rozwoju procesów dynamicznych, szybkozmiennych oraz zasięg terytorialny obejmujący obszar całej Europy i Atlantyku, gdzie ma genezę wiele z procesów wpływających na pogodę w Polsce. W przypadku procesów związanych z rozwojem komórek burzowych istotną zaletą produktów satelitarnych jest ich powtarzalność czasowa (5-15 min), możliwość analizy zarówno warunków przedkonwekcyjnych, jak i poszczególnych etapów rozwoju chmur konwekcyjnych. Dane satelitarne pozwalają na lokalizację obszarów, gdzie znajdują się mgły lub chmury niskie stratus w warunkach nocnych i w porze dziennej. Szczególnie ważne jest określanie zasięgu mgły w nocy i przed świtem, kiedy nie można jeszcze korzystać z czujników w świetle widzialnym o wyższej rozdzielczości przestrzennej. Jeśli chodzi o zagrożenia silnym wiatrem, produkty dotyczące powierzchni Morza Bałtyckiego ze względu na zasięg przestrzenny stanowią niezwykle cenne uzupełnienie obserwacji naziemnych niedostępnych na morzu. Produkty dotyczące pola wiatru w średniej i górnej troposferze mogą być wykorzystane w osłonie lotnictwa cywilnego. Istotną cechą przedstawionego kompleksowego wykorzystania wielu produktów satelitarnych dla najczęściej występujących zagrożeń naturalnych jest ich dostępność, a więc możliwość szerokiego wykorzystania. Celem niniejszej publikacji jest przedstawienie możliwości i sposobu realizacji takich działań. Ma to istotne znaczenie w aspekcie potencjalnych zmian klimatycznych i oczekiwanego zwiększenia częstości występowania zjawisk ekstremalnych na naszych szerokościach geograficznych.

#### **Literatura**

- Bauer-Bessmer B., 1995, Remote Sensing of Severe Hail Storms, Diss. ETH No. 11316, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich
- Bebłot G., Hołda I., Rorbek K., 2008, Trąba powietrzna w rejonie Częstochowy w dniu 20 lipca 2007 roku, [W:] Ekstrema pogodowe w Polsce, obserwacje, pomiary, prognozy, IMGW, Warszawa s. Monografie
- Bedka K. i in., 2010. Objective Satellite-Based Detection of Overshooting Tops Using Infrared Window Channel Brightness Temperature Gradients. J. of Applied Meteorology and Climatology, 49



- Bendix J., 1999. A fog monitoring scheme based on MSG data. In: ESA/EUMETSAT RAO Meteosat Second Generation (MSG) No.141
- Bodzak P., 2007. Detekcja i lokalizacja wyładowań atmosferycznych. IMGW, Warszawa
- Doswell C.A., III, 2001. Severe convective storms – An overview. Severe Convective Storms, Meteor. Monogr. No. 5, Amer. Meteor. Soc., 1-26
- George J.J., 1960. Weather Forecasting for Aeronautics, Academic Press, 673 pp.
- [http://www.eumetsat.int/Home/Main/Access\\_to\\_Data/Meteosat\\_Meteorological\\_Products/Product\\_List/index.htm?l=en](http://www.eumetsat.int/Home/Main/Access_to_Data/Meteosat_Meteorological_Products/Product_List/index.htm?l=en) – opis produktów EUMETSAT
- [http://www.eumetsat.int/metprods\\_webcast/main.htm](http://www.eumetsat.int/metprods_webcast/main.htm) – przewodnik omawiający generalne zasady tworzenia produktów meteorologicznych z danych satelitarnych
- <http://www.nwcsaf.org/> – omówienie produktów NWCSAF
- [http://www.nwcsaf.org/2010UsersWS/SAF-NWC-CDOP-INM-MGT-2010-US+WS\\_v1.1.pdf](http://www.nwcsaf.org/2010UsersWS/SAF-NWC-CDOP-INM-MGT-2010-US+WS_v1.1.pdf) Podsumowanie spotkania roboczego użytkowników pakietu NWCSAF, główne ograniczenia produktów i kierunki zmian na przyszłość
- <http://www.satreponline.org/event/fogweek.php> – zestaw najnowszych osiągnięć w dziedzinie monitorowania i wykrywania mgły za pomocą danych satelitarnych
- Jacobson R.A., 2003, Relationship of intracloud lightning radiofrequency power to lightning storm height, as observed by the FORTE satellite, J. of Geophysical Research, Vol. 108, No. D7, 4204
- Justo J.E. 1981. Fog structure. In: Clouds Their Formation, Optical Properties and Effects. Hobbs P.V. (ed.), Academic Press, London
- Koenig M., 2002, Atmospheric Instability Parameters Derived from MSG SEVIRI Observations. EUMETSAT Technical Memorandum No. 9.
- Koenig M., Pajek M., Struzik P., 2007, MSG Global Instability Indices for Storm Nowcasting – Validation Studies on product Quality and analysis of sensibility to input model data, In: Joint 2007, EUMETSAT and 15th AMS Conference, P.50
- Lelaćko I., Ziemiański M., 2004, Skrócony przewodnik po wybranych wskaźnikach konwekcji, Biuro Meteorologicznych Prognoz Morskich, IMGW Gdynia, (rękopis)
- Mecikalski J.R., 2009. MSG Convective Initiation Study, Final Report for EUMETSAT Contract EUM/CO/08/4600000538/MK (rękopis)
- Mecikalski J.R., Bedka K.M., 2006, Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving convection in daytime GOES imagery, Mon. Wea. Rev. 134, 49-78
- Mentzel P.W., 2006, Applications with meteorological satellites, International Summer School on Applications with the Newest Multi-spectral Environmental Satellites, Krakow 8-12 May 2006
- Pajek M., Iwanski R., König M., Struzik P., 2008, Extreme convective cases – the use of satellite products for storm nowcasting and monitoring. In: 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Darmstadt, Germany, EUMETSAT P.52
- Roberts R.D., Burgess D., Meister M., 2005, Developing Tools for Nowcasting Storm Severity. Weather and Forecasting, Vol. 21, pp 540-558.
- Schulz D.M., Schumacher P.N., 1999, The use and misuse of conditional Symmetric instability. Monthly Weather Review, Vol. 127, 2709-2732
- Setvak M., Rabin R.M., 2005, MSG observations of deep convective storm, [W:] Proc. The 2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Dubrovnik, Croatia, EUMETSAT, P.46. 460-466.
- Short range forecasting methods of fog, visibility and low clouds, COST Action 722, Final Report 2008, <http://137.248.191.94/index.php?id=207>
- Software Users Manual for the SAFNWC / MSG Application. SAF-NWC-IOP-INM-MGT-SUM\_v2.0.doc. EUMETSAT Satellite Application Facility to Nowcasting & Very Short Range Forecasting, 2009. <http://nwcsaf.inm.es/>

- Struzik P., 2011, Characterization of Storm Severity by Use of Selected Convective Cell Parameters Derived From Satellite Data, [W:] Proc. 2011 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Oslo 5-9.09.2011, EUMETSAT P.59
- Szewczak P., 2007, Meteorologia dla pilota samolotowego (PPL, CPL, ATPL, IR), AVIA-TEST, Poznań
- Uman M., Rakov V., 2003, Lightning: Physics and Effects, Cambridge University Press
- Ushio T. i in., 2001, A survey of thunderstorm flash rates compared to cloud top height using TRMM satellite data, J. Geophys. Res., 106, pp. 24089 – 24095
- Williams E.R., 2001, The electrification of severe storms, in Severe Convective Storms, edited by C.A.I. Doswell, chap. 13, pp. 527–561, Am. Meteorol. Soc., Boston, Mass.
- Zinner T., Betz H.D., 2009, Validation of METEOSAT Storm Detection and Nowcasting Based on Lightning Network Data, Proc. 2009 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, [www.eumetsat.int](http://www.eumetsat.int)

# **System analizy danych z modeli numerycznych oraz system asymilacji i analizy danych**

*Andrzej Mazur, Witold Interewicz, Joanna Linkowska,  
Piotr Drzewiecki, Marek Łazanowicz, Grzegorz Duniec*

## **1. Wstęp**

Numeryczne modele pogody są matematyczno-fizycznymi modelami przepływów atmosferycznych, które symulują ewolucję stanu środowiska atmosferycznego charakteryzowanego przez podstawowe parametry (elementy) fizyczne takie jak trójwymiarowe rozkłady temperatury, ciśnienia, gęstości, prędkości ruchu (wiatru), zawartości pary wodnej i jej kondensatów w postaci chmurowej i opadowej. Modele takie są podstawowym narzędziem pozwalającym służbom meteorologicznym na prowadzenie operacyjnej osłony kraju, społeczeństwa i gospodarki. Umożliwiają przygotowywanie wiarygodnych prognoz pogody oraz ostrzeżeń przed niebezpiecznymi zjawiskami meteorologicznymi. Uzyskiwane w wyniku działania modeli meteorologicznych prognostyczne pola elementów meteorologicznych są odpowiednio wykorzystywane w wielu gałęziach gospodarki narodowej, np. w transporcie drogowym, wodnym i lotniczym, osłonie kraju przed ekstremalnymi zjawiskami meteorologicznymi, czy też osłonie i zabezpieczeniu działań wojska.

Celem nadrzędnym badań opisywanych w niniejszym opracowaniu jest poprawa jakości prognoz meteorologicznych, czyli opisu stanu atmosfery – w przyszłości, za pomocą poprawy jakości wyników prognoz numerycznych. Metody, służące do polepszenia tych prognoz są bardzo różne. Jedną z nich jest zastosowanie procesu asymilacji danych obserwacyjnych i pomiarowych.

Implementacja systemu asymilacji umożliwi jednocześnie IMGW-PIB dostarczanie informacji w zakresie diagnozowania i prognozowania stanu atmosfery dla ludności, środowiska naturalnego, infrastruktury i całej gospodarki narodowej. Efektem realizowanych prac będzie podniesienie skuteczności prowadzonej przez IMGW-PIB osłony hydrologiczno-meteorologicznej kraju, a to dzięki:

- przystosowaniu i wdrożeniu metodyki asymilacji danych obserwacyjnych w obszarze numerycznych prognoz meteorologicznych,

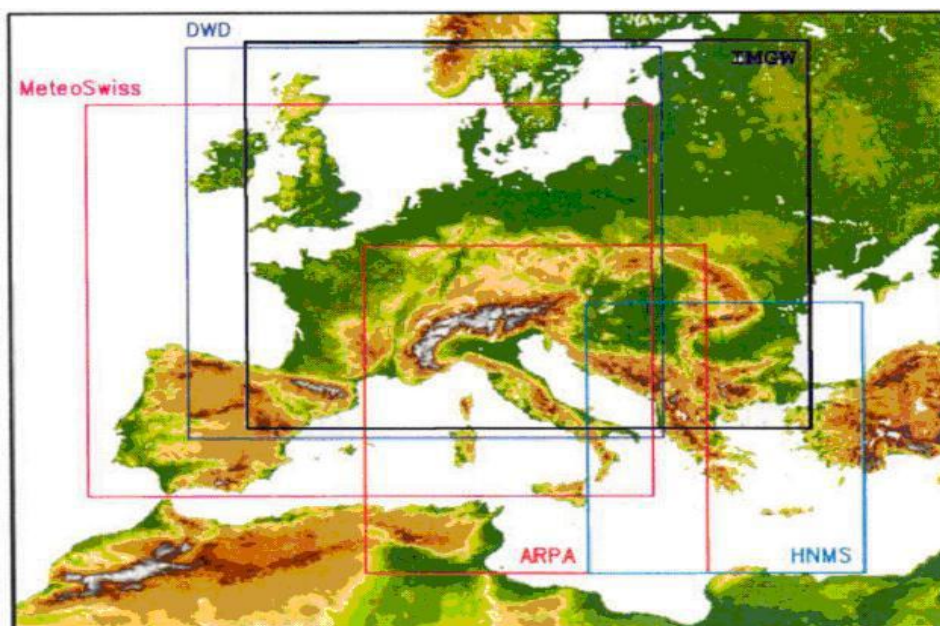
- ilościowemu i jakościowemu rozwojowi merytorycznemu w zakresie jakości prognoz,
- pozyskaniu, wypracowaniu i wdrożeniu nowych, skuteczniejszych, wydajniejszych i doskonalszych narzędzi modelowania i prognozowania,
- wdrożeniu zmian metodyki opracowywania i dystrybucji wyników prognoz.

## **2. Przygotowanie systemu operacyjnej asymilacji i analizy danych w modelu numerycznym – przebudowa systemu, wdrożenie cyklu analizy**

Obliczenie numerycznej prognozy pogody jest rozwiązaniem pewnego zagadnienia początkowego – na podstawie stanu atmosfery w chwili  $T$ , model numeryczny wyznacza przyszły stan atmosfery w chwili  $T + \Delta T$ . Dokładność prognozy zależy zatem od jakości warunku początkowego – powinien on jak najdokładniej odzwierciedlać rzeczywisty stan atmosfery w chwili  $T$ . Wykonanie prognozy numerycznej musi być więc poprzedzone wyznaczeniem realistycznego stanu początkowego modelu, tzn. wartości wszystkich zmiennych prognostycznych w każdym z węzłów domeny modelu. Proces, w którym na podstawie danych obserwacyjnych jest estymowany chwilowy stan atmosfery, nosi nazwę asymilacji danych obserwacyjnych. Uzyskuje się analizę – trójwymiarowy obraz atmosfery wyrażony za pomocą wybranych pól fizycznych (temperatury, wilgotności, wektorów składowych pola wiatru itp.). Podstawowym zastosowaniem analizy jest inicjalizacja prognozy numerycznej (analiza zawiera wówczas pola zmiennych prognostycznych modelu).

W modelach regionalnych, obejmujących ograniczony obszar, wpływ na modelowany stan atmosfery mają również boczne warunki brzegowe. Determinują one zjawiska zachodzące na brzegu domeny, np. własności fizyczne mas powietrza napływających do obszaru domeny z zewnątrz. Źródłem bocznych warunków brzegowych dla modeli regionalnych są modele numeryczne obejmujące większy obszar, ale pracujące z mniejszą rozdzielczością przestrzenną; najczęściej są to modele globalne. Model regionalny, dzięki większej rozdzielczości przestrzennej i bardziej szczegółowo odwzorowanej orografii, m.in. przez uwzględnienie zjawisk mezoskalowych w wysokiej rozdzielczości, np. związanych z konwekcją czy wpływem podłoża, udokładnia prognozę globalną. Również warunek początkowy o dostatecznej szczegółowości stosowany do inicjalizacji prognozy regionalnej ma wpływ na prognozę zjawisk w mniejszej skali.

Wpływ warunku początkowego jest jednak ograniczony w czasie. Adwekcja powoduje wymywanie informacji pochodzącej z warunku początkowego poza obszar domeny. Czas, po którym ta informacja zostaje usunięta poza domenę, jest często przyjmowany za praktyczne oszacowanie zasięgu czasowego prognozy regionalnej (wynosi on ok. 2-3 doby, w zależności od rozmiarów domeny modelu, zob. rys.2, gdzie pokazano, jak dzięki adwekcji obserwacje z jednego punktu mają wpływ na duży obszar domeny).



Rys. 1 Domena modelu COSMO, pracującego w IMGW-PIB, na tle domen innych członków konsorcjum COSMO. (COSMO Newsletter No. 4, 2004)

Model COSMO (*Consortium for Small-Scale Modelling* [zob. Doms 2011, Doms et al. 2011]) jest tak zwanym modelem regionalnym. Oznacza to, że obszar (domena), dla którego jest liczona prognoza, obejmuje tylko zadany wycinek atmosfery otaczającej Ziemi w rejonie prognozy (zob. rys. 1 – Domena modelu COSMO, pracującego w IMGW-PIB). W podstawowej wersji operacyjnej, jak również w wersji operacyjnej z asymilacją danych, opisaną w niniejszym opracowaniu, model działa na domenie o wielkości 2700 x 2250 km, w rozdzielczości poziomej 7 km, pionowej – czterdzieści poziomów (do wysokości – orientacyjnie – ok. 25 km nad poziom morza) i horyzoncie czasowym prognozy 78 godzin.

Zasadniczą częścią modelu jest układ równań różniczkowych, opisujących przepływ mas powietrza. Równania są rozwiązywane numerycznie i, aby było to możliwe, potrzebny jest warunek początkowy (definiujący stan początkowy modelowanego systemu i zwany w meteorologii polem analizy) oraz warunki brzegowe.

W modelu COSMO eksploatowanym w IMGW-PIB, warunek początkowy i warunki brzegowe są pobierane z modelu globalnego GME (Globalny Model Meteorologiczny, *Global Modell Ersatz*) liczonego w DWD (Niemiecka Służba Meteorologiczna, *Deutscher Wetterdienst*). Przygotowanie warunków brzegowych sprowadza się do odpowiedniej interpolacji fragmentów pól prognozy uzyskanej z modelu GME. Przygotowanie warunku początkowego również sprowadza się do interpolacji, lecz źródłem danych jest warunek początkowy użyty do inicjalizacji modelu globalnego [Schaettler 2009].

Dokładność rozwiązania równań modelu regionalnego (mierzona ostatecznie stopniem zgodności prognozy z realizacją rzeczywistością w atmosferze) silnie zależy

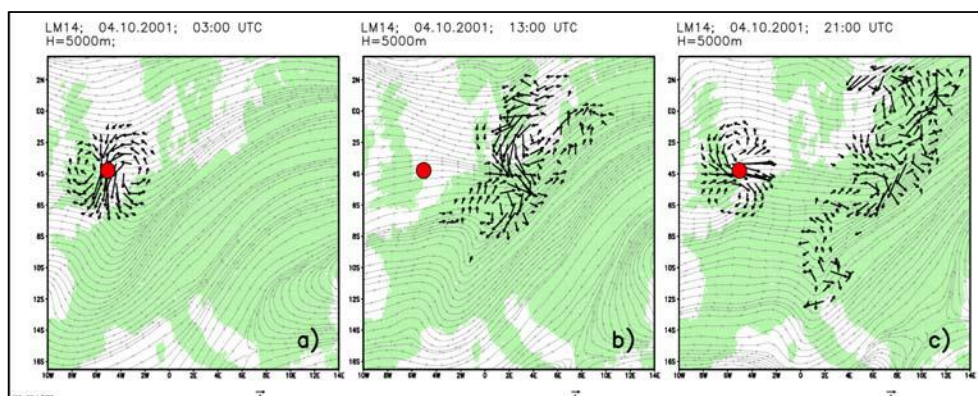
od jakości pola analizy i warunków brzegowych. Pola analizy używane do inicjalizacji w modelu regionalnym, uzyskane za pomocą samej interpolacji warunku początkowego z modelu globalnego, dają prognozy zgodne z rzeczywistością, z akceptowalnym błędem. Istnieją jednak inne sposoby przygotowania pola analizy, lepiej określające stan początkowy modelu, w efekcie prowadzące do mniejszego błędu i lepszych rezultatów prognostycznych (w sensie statystycznej weryfikacji prognozy). Jedną z takich metod jest nazywana cyklem analizy.

### Cykl analizy

Cykl analizy to jedna z procedur z zakresu tzw. asymilacji danych. Polega ona na cyklicznym wykonywaniu, między głównymi terminami liczenia prognozy, krótkich przebiegów prognostycznych modelu regionalnego (np. 3-godzinnych) z uwzględnieniem danych obserwacyjnych i pomiarowych. Pierwszy przebieg jest zasilany polem analizy wziętym z modelu mniejszej rozdzielczości (z reguły – w przypadku modeli regionalnych – z modelu globalnego). Kolejne przebiegi są już zasilane polami analizy pochodzącymi z poprzedniego, krótkiego przebiegu modelu regionalnego i uwzględniającymi „najświeższe” dane obserwacyjne.

W modelu COSMO do asymilacji danych wykorzystuje się metodę zwaną *nudgingiem*, polegającą na wprowadzeniu do równań modelu dodatkowego członu odpowiedzialnego za wymuszenie (czyli dopasowanie bądź dosłownie „nagięcie” wartości prognozowanych do danych obserwacyjnych). Człon ten jest odpowiednio uzależniony od asymilowanych danych pomiarowych. Szczegółowe informacje na ten temat znajdują się w dokumentacji modelu [Schraff, Hess 2003].

Model COSMO ma interfejs umożliwiający asymilację danych, m.in. z depech PILOT, TEMP, SYNOP, AIREP, AMDAR, ACARS, SHIP i DRIBU oraz z pomiarów GPS. Asymilacja jest poprzedzana szczątkową kontrolą jakości danych (wyłapywanie błędów grubych) i eliminacją redundancji.



Rys. 2. Rozprzestrzenianie informacji pomiarowej w cyklu analizy – przykład z jedną stacją pomiarową (czerwony punkt); strzałki przedstawiają wektorowe różnice między polami wiatru uzyskanymi z uwzględnieniem i bez uwzględnienia obserwacji: a) na podstawie pomiaru wprowadzono poprawkę do pola wiatru; b) po kilku godzinach wpływ poprawki widoczny w znacznej odległości od punktu obserwacji; c) wprowadzono kolejną poprawkę

Należy jednak pamiętać, że – jak wynika z rys. 2 – wykorzystanie niewielkiej liczby stacji pomiarowych w asymilacji danych może powodować nieciągłości lub nierealne zaburzenia pól meteorologicznych prognozowanych w modelu.

Każdy przebieg, z konieczności, jest zasilany warunkami brzegowymi z najnowszej dostępnej prognozy z modelu globalnego. W efekcie, do następnego głównego terminu liczenia prognozy, dzięki policzeniu ciągu krótkich przebiegów z ciągłą asymilacją danych pomiarowych, powstaje pole analizy (warunek początkowy) nadające się do inicjalizacji obliczeń prognozy. Takie postępowanie ma kilka zalet.

1. Pole analizy w cyklu odpowiednio odległym od pierwszego (w którym pole pochodziło z modelu globalnego) jest generowane przez model regionalny i nie pochodzi z interpolacji. Oznacza to zgodność na poziomie numerycznym. Generowane pole zawiera dokładnie te mody rozwiązań, które są reprezentowane przez równania modelu regionalnego.
2. Cykl analizy działa między terminami głównymi liczenia modelu (tzn. między uruchomieniami modelu z wykorzystaniem danych wejściowych z godziny 00:00 UTC<sup>1</sup> i 12:00 UTC). Również sam model regionalny jest uruchamiany z co najmniej dwugodzinnym opóźnieniem względem terminu danych wejściowych (00:00 UTC i 12:00 UTC). To oznacza, że pole wygenerowane w cyklu analizy może być wygenerowane na podstawie większej ilości danych pomiarowych (w rozumowaniu tym zakłada się, że nie wszystkie dane pomiarowe spływają terminowo i w związku z tym mogą nie być dostępne w chwili przygotowywania warunku początkowego do modelu globalnego).
3. Warunek początkowy modelu globalnego jest przygotowywany na podstawie ograniczonej puli danych pomiarowych. Dane z niektórych źródeł lokalnych nie są wymieniane między służbami meteorologicznymi. To oznacza, że przygotowując za pomocą cyklu analizy warunek początkowy dla modelu regionalnego dla terytorium Polski, ma się do dyspozycji większą pulę danych i można oczekiwać, że w pewnych sytuacjach powinno to mieć istotny i pozytywny wpływ na jakość prognozy.
4. Krótkie przebiegi modelu wykonywane w cyklu analizy dają po każdym zakończeniu nowe pole analizy. Dzięki temu możliwe jest poprawne zorganizowanie dodatkowych cykli obliczeń prognoz krótkoterminowych w wyższej rozdzielczości.
5. W dużym stopniu jest wyeliminowany efekt tzw. *spin-up* modelu (czyli niejako nabierania rozpędu, „rozkręcania się” prognozy w ciągu pierwszych kilku godzin<sup>2</sup>). Umożliwia to znacznie efektywniejsze wykorzystania wyników –

---

<sup>1</sup> Uniwersalny czas koordynowany, UTC (ang. *Universal Time Clock* lub *Coordinated Universal Time*, fr. *Temps Universel Coordonné*) – wzorcowy czas ustalany na podstawie TAI (fr. *Temps Atomique International*), uwzględniający nieregularność ruchu obrotowego Ziemi i koordynowany względem czasu słonecznego.

<sup>2</sup> *Spin-up* numerycznego modelu meteorologicznego to efekt polegający na stopniowym polepszaniu się jakości prognoz modelu w ciągu pierwszych kilku godzin prognozy – model generuje prognozy „lepsze” (bardziej zbliżone do rzeczywistości) dla terminów bardziej odległych w czasie od początku prognozy.

prognoz numerycznych – na potrzeby prognoz natychmiastowych (tzw. *now-castingu*).

#### *Organizacja obliczeń modelu COSMO*

Aktualnie, w IMGW model COSMO jest liczony dla 2 głównych terminów startu prognozy, czyli 00:00 UTC i 12:00 UTC. Obliczenia są wykonywane w oknach czasowych od 02:45 do 13:00 UTC i od 14:45 do 01:00 UTC.

Model jest uruchamiany na początku okna czasowego, w odpowiedzi na rozpoczęcie spływu danych z modelu globalnego GME w DWD.

Przebieg procesu obliczeń jest sterowany systemem skryptów napisanych w języku powłoki [Schaettler et al. 2009]. Jego konstrukcja umożliwia automatyczne uruchamianie obliczeń prognozy w przewidzianych terminach oraz ograniczone czynności z zakresu zarządzania danymi.

Wdrożenie cyklu analizy wymagało przede wszystkim przebudowy i generalizacji systemu kontrolującego wykonanie modelu, w tym zwłaszcza:

- wdrożenia, przetestowania i operacyjnego uruchomienia i utrzymania systemu bazy danych pomiarowych i obserwacyjnych, dedykowanej do obsługi systemu asymilacji;
- rozbudowy konfiguracji systemu uruchomieniowego, zwłaszcza przez umożliwienie elastycznego definiowania zbiorów plików wejściowych, w celu odpowiedniego połączenia strumienia danych napływających z modelu globalnego ze strumieniem danych produkowanym przez cykl analizy, oraz rozbudowy możliwości konfiguracji okien czasowych;
- odpowiedniej przebudowy i rozbudowy systemu skryptów odpowiedzialnych za odbiór danych z modelu globalnego i uruchomienie obliczeń modelu, wraz ze zwiększeniem niezawodności systemu przez wprowadzenie obsługi błędów i komplementarnych procedur awaryjnych;
- przygotowania konfiguracji modelu COSMO do pracy w trybie cyklu analizy.

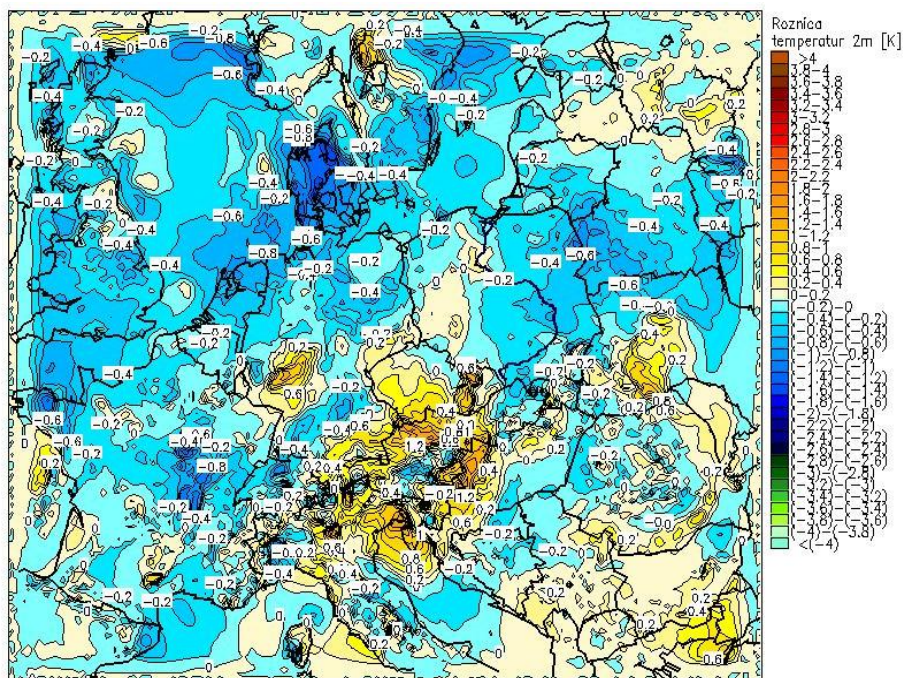
### **3. Testowe wdrożenie Cyklu Analizy i Asymilacji Danych (CAAD) – wyniki**

W testowym uruchomieniu cyklu analizy korzystano z jednej z pośrednich wersji rozwojowych nowego systemu uruchomieniowego. Wykonano kilka kroków cyklu asymilacji prowadzących do wygenerowania pól analizy, nadających się do zainicjowania modelu.

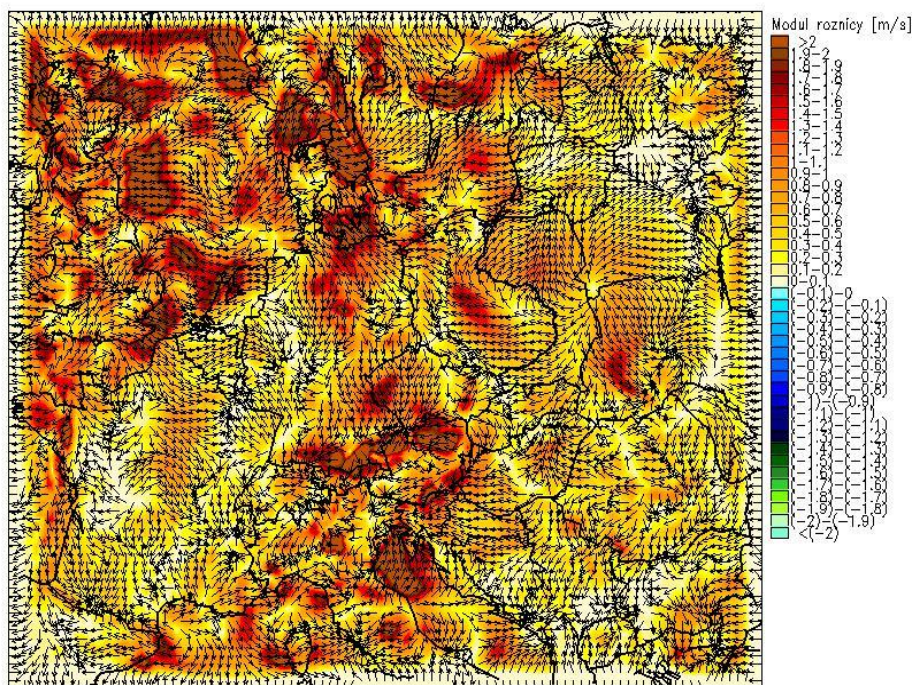
Używając wygenerowanych pól analizy jako warunku początkowego, wykonano testowy przebieg prognostyczny.

Wyniki z testowego wdrożenia różniły się – jak należało oczekiwać – od operacyjnej prognozy, wykonanej dla tego samego terminu. Na rysunkach 3-4 przedstawiono różnice wartości pól temperatury i prędkości wiatru.





Rys. 3. Różnice wartości prognozy temperatury między przebiegiem z AD i bez asymilacji

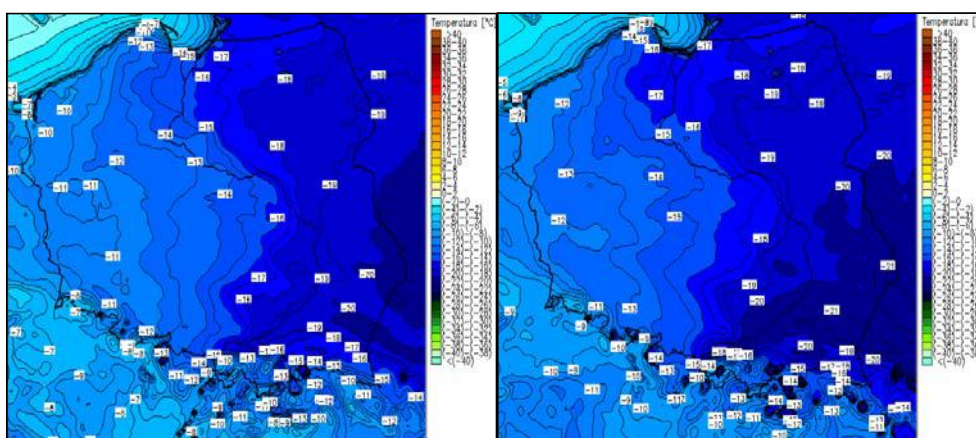


Rys. 4. Różnice prognozy pola wiatru między przebiegiem z AD i bez asymilacji danych

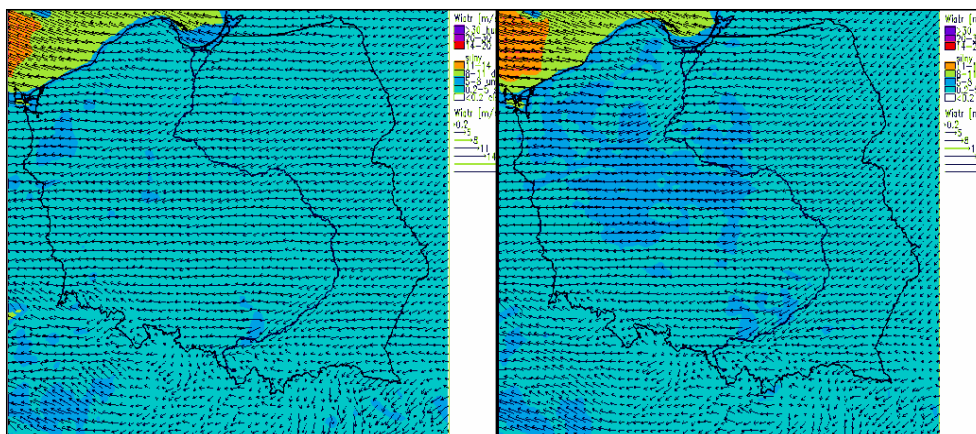


#### 4. Operacyjne wdrożenie CAAD

Korzystając z przygotowanego środowiska i wykorzystując wyniki testów (opisanych w p. 3), wprowadzono działający operacyjnie system uruchomieniowy z obsługą Cyklu Analizy i Asymilacji Danych (CAAD). CAAD pracuje operacyjnie, dostarczając prognoz zgodnie z przyjętymi założeniami. Cztery razy na dobę (po dwa razy w terminach głównych oraz pośrednich) są wykonywane krótkie (sześciogodzinne) odcinki cyklu analizy (CA) oraz następujące po nich prognozy z wykorzystaniem asymilacji danych (AD) o horyzoncie czasowym 78 godzin (w terminach głównych) oraz 48 godzin (w terminach pośrednich).



Rys. 5a Prognozy temperatury powietrza na wysokości 2 m npg bez asymilacji danych (lewy panel) i z wykorzystaniem AD (prawy panel)



Rys. 5b Prognozy pola wiatru na wysokości 10 m npg bez asymilacji danych (lewy panel) i z wykorzystaniem AD (prawy panel)

Przykładowe wyniki (porównanie prognoz bez AD i z wykorzystaniem AD) przedstawiono na rys. 5. Różnice odzwierciedlają efekt uwzględnienia najnowszych danych obserwacyjnych w bieżącej prognozie.

## 5. Analiza wyników wdrożenia CAAD

Wszystkie rezultaty i analizy dotyczą prognozy o horyzoncie czasowym 78 godzin i rozdzielczości przestrzennej 7 km, na domenie identycznej z domeną operacyjną modelu COSMO, pracującego w IMGW-PIB (zob. rys. 1).

Podstawowa część analizy wyników dotyczy okresu pierwszych czterech miesięcy roku 2012. Poniższe tabele i rysunki zawierają porównania wartości zmierzonych na stacjach z prognozami uzyskanymi z użyciem asymlacji danych obserwacyjnych oraz bez jej wykorzystania.

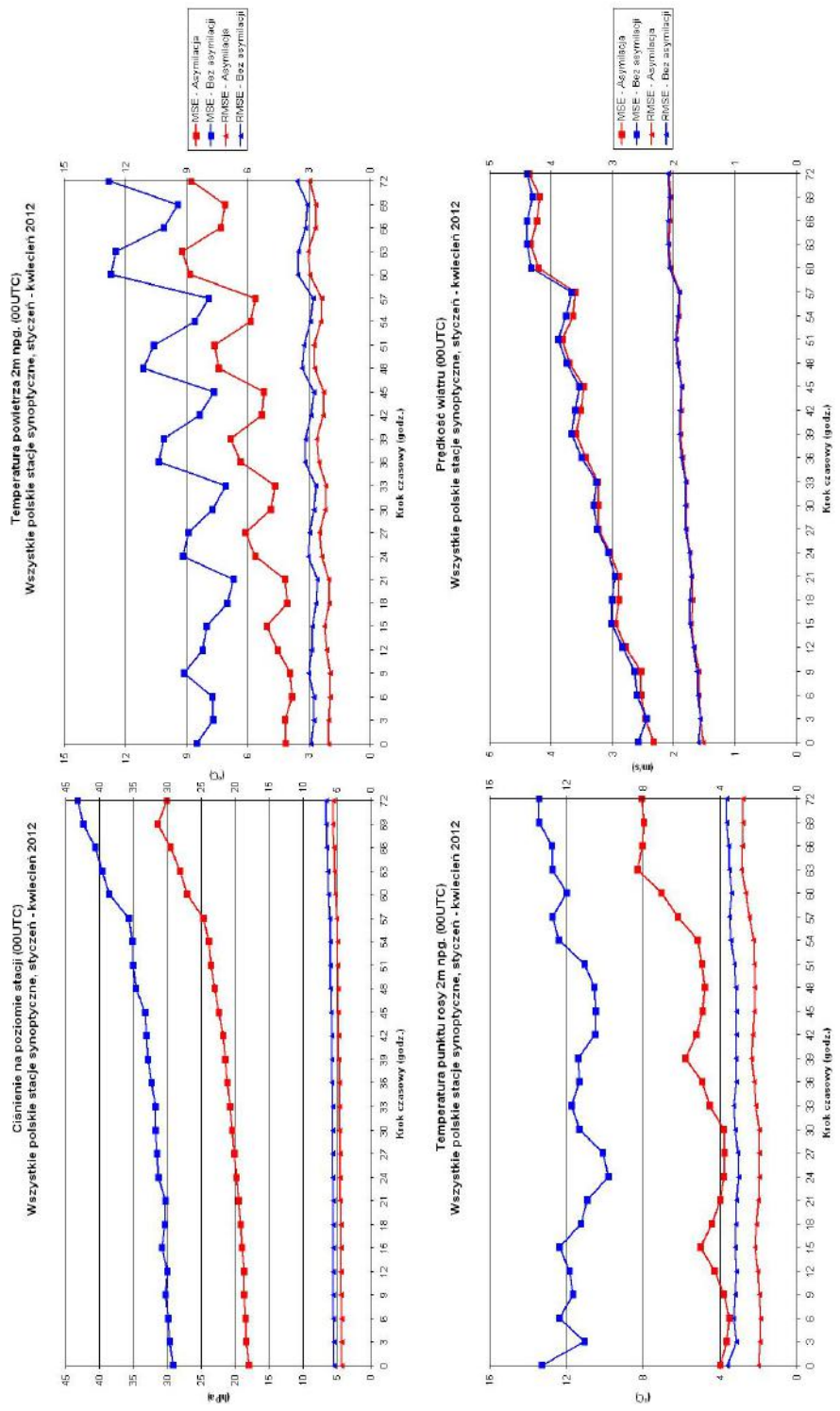
Obliczenia i rysunki zostały wykonane z użyciem programu *VERSUS (VERification SUite)*, służącego do weryfikacji, analizy i wizualizacji wyników prognoz, zunifikowanego w ramach konsorcjum COSMO.

### Elementy o charakterze ciągłym

Zgodnie z zaleceniami Technicznego Memorandum ECMWFnr 430 [Nurmi, 2003] weryfikacja prognoz elementów takich, jak temperatura powietrza, prędkość wiatru, ciśnienie atmosferyczne opiera się na podstawowych wskaźnikach, takich jak *Mean Error* (błąd średni, ME), *Mean Absolute Error* (średni błąd bezwzględny, MAE), *Mean Square Error* (średni błąd kwadratowy, MSE) lub *Root Mean Square Error* (pierwiastek z MSE, RMSE).

Tab. 1. Statystyki różnic między wartościami temperatury powietrza (°C), prędkości wiatru (m/s) oraz ciśnienia (hPa) mierzonymi na stacjach meteorologicznych i prognozowanymi bez użycia i z wykorzystaniem asymlacji danych, okres analizy: dwa kolejne miesiące

Element prognozy	Okres analizy	Godzina prognozy	ME		MAE		MSE	
			Asymlacja	Bez asym.	Asymlacja	Bez asym.	Asymlacja	Bez asym.
Temperatura powietrza	styczeń-luty 2012	24	1,674	1,653	1,959	2,041	6,344	6,905
		48	1,915	1,841	2,219	2,245	7,967	8,008
		72	1,897	1,862	2,415	2,453	9,324	9,499
	marzec-kwiecień 2012	24	0,639	1,658	1,731	2,606	4,011	22,21
		48	0,914	2,008	2,042	2,996	4,883	22,807
		72	1,253	2,34	2,265	3,213	5,636	22,456
Prędkość wiatru	styczeń-luty 2012	24	-0,46	-0,42	1,351	1,325	3,271	3,144
		48	-0,471	-0,416	1,499	1,478	4,034	3,844
		72	-0,554	-0,48	1,636	1,614	4,644	4,496
	marzec-kwiecień 2012	24	-0,265	-0,298	1,3	1,322	2,855	2,922
		48	-0,273	-0,3	1,422	1,441	3,448	3,536
		72	-0,286	-0,323	1,571	1,587	4,117	4,206
Ciśnienie atmosferyczne	styczeń-luty 2012	24	0,561	1,65	2,743	3,581	20,87	34,953
		48	0,433	1,451	3,158	3,947	24,314	37,824
		72	0,93	1,784	3,83	4,676	32,065	47,568
	marzec-kwiecień 2012	24	-0,265	-0,298	1,3	1,322	2,855	2,922
		48	-0,273	-0,3	1,422	1,441	3,448	3,536
		72	-0,286	-0,323	1,571	1,587	4,117	4,206



Rys. 6. Statystyki różnic MSE i RMSE między wartościami – ciśnienia atmosferycznego, temperatury powietrza, temperatury punktu rosy i prędkości wiatru – mierzonymi na stacjach i prognozowanymi bez użycia i z użyciem asymilacji danych w okresie styczeń-kwiecień 2012

Tab. 2. Statystyki różnic (ME, MAE, MSE) między wartościami mierzonymi na stacjach meteorologicznych i prognozowanymi bez użycia i z użyciem asymilacji danych, okres analizy: 01-04. 2012

Element prognozy	Godzina prognozy	ME		MAE		MSE	
		Asymilacja	Bez asym.	Asymilacja	Bez asym.	Asymilacja	Bez asym.
Temperatura powietrza (°C)	24	1,163	1,655	1,847	2,318	5,643	9,204
	48	1,421	1,923	2,132	2,613	7,445	11,141
	72	1,577	2,096	2,341	2,825	8,791	12,821
Prędkość wiatru (m/s)	24	-0,363	-0,36	1,326	1,324	3,07	3,037
	48	-0,372	-0,359	1,462	1,461	3,75	3,697
	72	-0,419	-0,402	1,604	1,601	4,388	4,359
Ciśnienie atmosferyczne (hPa)	24	0,625	1,705	2,657	3,45	19,797	31,301
	48	0,725	1,758	3,077	3,85	23,052	34,645
	72	1,276	2,208	3,73	4,535	30,099	43,263

Tabele 2-3 zawierają porównania tych wskaźników dla wyżej wymienionych elementów prognozy, w poszczególnych okresach dwumiesięcznych oraz dla całego okresu styczeń – kwiecień 2012.

Na rysunkach 6 przedstawiono przykładowe statystyki dla wybranych elementów prognostycznych uzyskanych z użyciem (*Asymilacja*) i bez wykorzystania asymilacji danych (*Bez asymilacji*).

Jeśli chodzi o zastosowanie CAAD w prognozach elementów meteorologicznych o charakterze ciągłym, to należy podkreślić, że prawie we wszystkich przypadkach użycie asymilacji powoduje polepszenie prognozy – zmniejszenie zarówno MAE, jak i MSE (czy też RMSE) dla praktycznie wszystkich terminów prognozy. Analizowane wskaźniki statystyczne – zarówno MAE, jak i MSE (czy też RMSE) – zmniejszyły swoje wartości dla wszystkich terminów prognozy. Warto zwrócić uwagę, że w całym analizowanym okresie zaobserwowano bardzo istotne polepszenie jakości prognozy ciśnienia (spadek MSE o 10hPa). Użycie asymilacji danych w bardzo znaczący sposób poprawiło jakość prognoz temperatury powietrza o oraz temperatury punktu rosy (spadek MSE o 4°C w obydwu przypadkach) z kolei w marcu i kwietniu 2012, co miało wpływ na średnie statystyki w całym analizowanym okresie styczeń – kwiecień. Zatem w odniesieniu do wszystkich analizowanych elementów zaobserwowano wzrost jakości prognozy w rozumieniu zmian wartości wskaźników statystycznych.

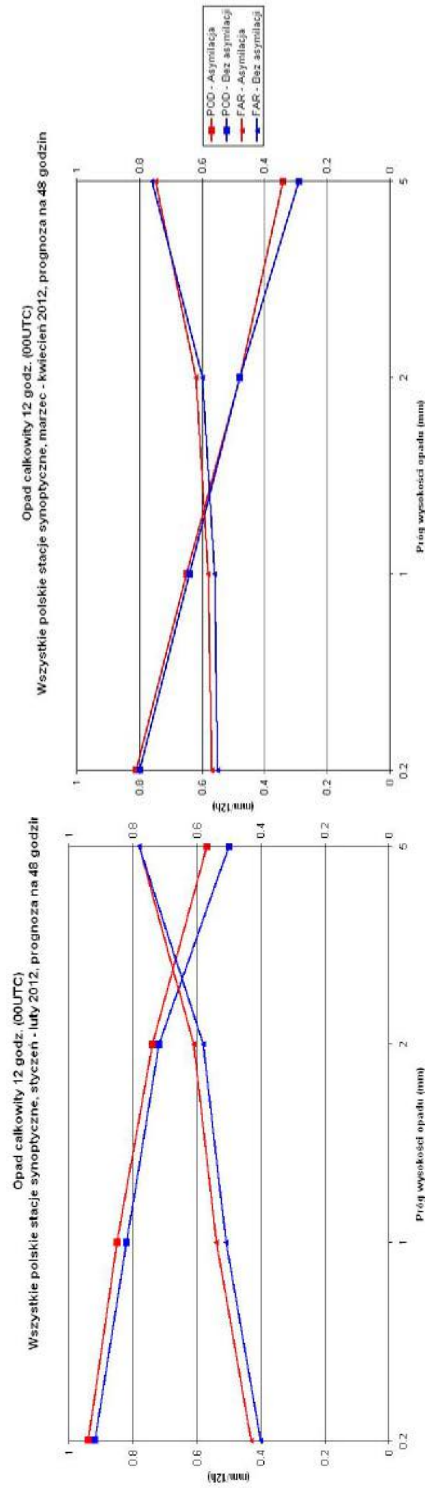
#### *Elementy o charakterze dyskretnym*

Do analizy i weryfikacji prognozy opadu, będącego elementem o charakterze dyskretnym, wybrano metodę opartą na tablicach dwudzielczych (kontyngencji), wyznaczonych dla zadanych progów sum opadu. Wobec tego z punktu widzenia statystyki analiza i weryfikacja prognozy opadu sprowadza się do analizy dychotomicznej (tak/nie czy też 0/1).

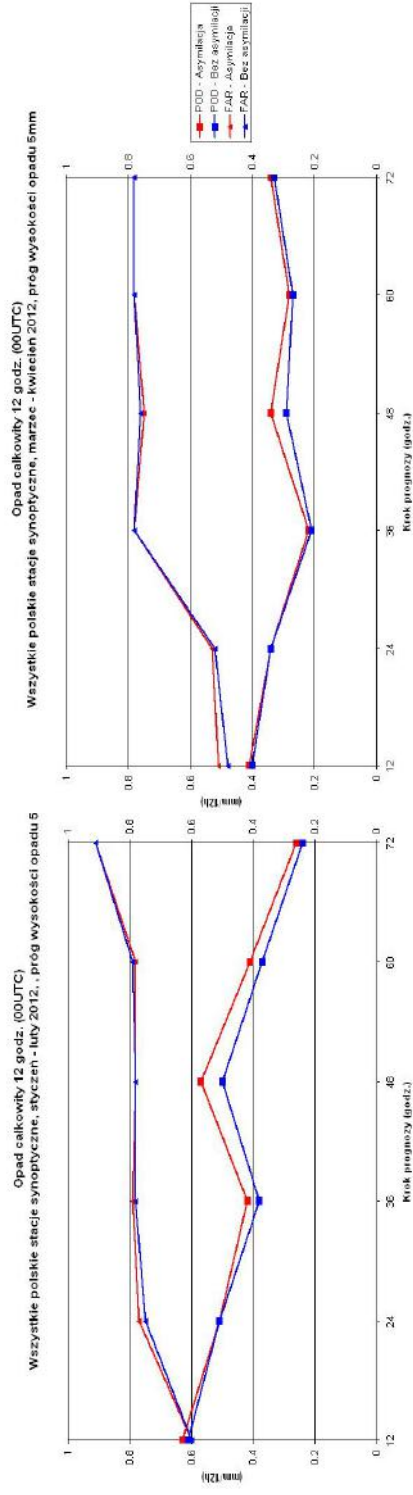
Podstawowe wskaźniki, zgodnie z zaleceniami Technicznego Memorandum ECMWF nr 430 [Nurmi, *ibid.*], które zostały obliczone dla tego elementu, to FBI (*Frequency Bias Index* – wskaźnik częstości błędów), POD (*Probability of Detection*

Tab. 3. Wskaźniki statystyczne FBI, POD, FAR i ETS dla prognoz 24-godzinnych sum opadu dla poszczególnych godzin prognozy i progów wysokości opadu, uzyskane bez użycia i z wykorzystaniem asymilacji danych

Godzina prognozy	Próg wysokości opadu	FBI		POD		FAR		ETS	
		Asymilacja	Bez asym.	Asymilacja	Bez asym.	Asymilacja	Bez asym.	Asymilacja	Bez asym.
Okres analizy - styczeń-luty 2012									
24	0,2	1,63	1,48	0,97	0,94	0,41	0,36	0,34	0,39
24	1	1,76	1,57	0,88	0,85	0,5	0,46	0,33	0,36
24	2	1,77	1,57	0,79	0,75	0,56	0,53	0,31	0,33
24	5	2,23	2	0,51	0,51	0,77	0,75	0,17	0,19
48	0,2	1,64	1,52	0,94	0,92	0,43	0,4	0,3	0,34
48	1	1,85	1,66	0,85	0,82	0,54	0,51	0,28	0,3
48	2	1,89	1,74	0,74	0,72	0,61	0,58	0,25	0,27
48	5	2,6	2,27	0,57	0,5	0,78	0,78	0,17	0,16
72	0,2	1,63	1,47	0,86	0,83	0,47	0,43	0,23	0,27
72	1	1,74	1,54	0,74	0,69	0,57	0,55	0,22	0,23
72	2	1,72	1,54	0,57	0,53	0,67	0,66	0,17	0,18
72	5	2,79	2,65	0,26	0,24	0,91	0,91	0,05	0,05
Okres analizy - marzec-kwiecień 2012									
24	0,2	1,41	1,33	0,79	0,78	0,44	0,42	0,36	0,38
24	1	1,14	1,11	0,67	0,65	0,42	0,41	0,38	0,38
24	2	0,89	0,86	0,52	0,52	0,42	0,4	0,33	0,34
24	5	0,72	0,71	0,34	0,34	0,53	0,52	0,23	0,24
48	0,2	1,9	1,78	0,81	0,8	0,57	0,55	0,24	0,26
48	1	1,54	1,45	0,65	0,64	0,58	0,56	0,25	0,27
48	2	1,26	1,19	0,48	0,48	0,62	0,6	0,21	0,23
48	5	1,33	1,2	0,34	0,29	0,75	0,76	0,15	0,13
72	0,2	1,87	1,75	0,75	0,75	0,6	0,57	0,2	0,22
72	1	1,6	1,49	0,59	0,58	0,63	0,61	0,2	0,21
72	2	1,34	1,31	0,44	0,46	0,68	0,65	0,17	0,19
72	5	1,55	1,51	0,34	0,33	0,78	0,78	0,13	0,13
Okres analizy - styczeń-kwiecień 2012									
24	0,2	1,52	1,405	0,88	0,86	0,42	0,39	0,35	0,38
24	1	1,45	1,34	0,77	0,75	0,46	0,43	0,35	0,37
24	2	1,33	1,21	0,65	0,63	0,49	0,46	0,32	0,33
24	5	1,47	1,35	0,42	0,42	0,65	0,63	0,2	0,21
48	0,2	1,77	1,65	0,87	0,86	0,5	0,47	0,27	0,3
48	1	1,69	1,55	0,75	0,73	0,56	0,53	0,26	0,28
48	2	1,57	1,46	0,61	0,6	0,61	0,59	0,23	0,25
48	5	1,96	1,73	0,45	0,39	0,76	0,77	0,16	0,14
72	0,2	1,75	1,61	0,80	0,79	0,53	0,5	0,21	0,24
72	1	1,67	1,51	0,66	0,63	0,6	0,58	0,21	0,22
72	2	1,53	1,42	0,50	0,49	0,67	0,65	0,17	0,18
72	5	2,17	2,08	0,3	0,28	0,84	0,84	0,09	0,09



Rys. 7a. Statystyczne wskaźniki opadowe POD i FAR dla 12-godzinnych sum opadu dla okresu styczeń – luty oraz marzec – kwiecień dla zadanych progów wysokości opadu – 0.2, 1, 2 oraz 5 mm; prognoza na 48 godz.



Rys. 7b. Statystyczne wskaźniki opadowe POD i FAR dla 12-godzinnych sum opadu dla okresu styczeń – luty oraz marzec-kwiecień dla progów wysokości opadu 5 mm dla poszczególnych godzin prognozy.

– prawdopodobieństwo wykrycia wystąpienia), FAR (*False Alarm Ratio* – ilość fałszywych alarmów) oraz ETS (*Equitable Threat Score* – wskaźnik zrównoważenia prognozy). FBI dla idealnej prognozy wynosi 1. Gdy jest poniżej (powyżej) jedności, prognoza niedoszacowuje (przeszacowuje) zjawisko. Z kolei POD jest w granicach 0–1. Idealna prognoza to  $POD = 1$ . FAR zmienia się od 0 do 1, z idealną prognozą osiąganą dla  $FAR = 0$ . ETS może mieć wartości od  $-1/3$  do jedności, z  $ETS = 1$  określającym idealną prognozę (zob. opisy wskaźników w rozdziale – *System weryfikacji rozmytej*). Wskaźniki te zostały również wybrane do jednolitej weryfikacji jakości prognoz opadu w ramach całego konsorcjum COSMO.

W tabeli 3 zestawiono wartości tych wskaźników dla okresów dwumiesięcznych (styczeń-luty oraz marzec-kwiecień) i dla całego okresu styczeń-kwiecień 2012 dla 24-godzinnych sum opadu (prognozowanych i obserwowanych). Przyjęto do analizy następujące progi czułości: 0,2, 1, 2 oraz 5 mm – zgodnie z metodyką przyjętą w konsorcjum COSMO. Analogiczną analizę przeprowadzono dla sześciu i dwudziestoczworgodzinnych sum opadu, a także dla poszczególnych miesięcy.

Z kolei rysunki 7a-b zawierają przykłady statystyk dla opadów z wykorzystaniem wskaźników POD i FAR – porównanie prognoz uzyskanych bez użycia i z wykorzystaniem asymilacji danych.

Wykorzystanie asymilacji danych obserwacyjnych nie poprawia prognozy opadu (jako elementu dyskretnego) w takim stopniu, jak można było oczekiwać. W związku z niewielkim zwiększeniem wskaźnika FBI (większe przeszacowanie zjawiska) poprawia się generalnie prawdopodobieństwo wykrycia opadu POD, natomiast zwiększa się też wskaźnik „fałszywych alarmów”, co nie jest z oczywistych względów pożądane. Należy jednak mieć na uwadze, że ilość opadów w analizowanym okresie nie była zbyt duża (w tym zwłaszcza ilość opadów intensywnych), zatem wyników tych nie można traktować jako reprezentatywnych.

#### *Studium przypadku – wpływ użycia CAAD na prognozy w warunkach zmiany sytuacji atmosferycznej*

Dalsza część analizy dotyczy przykładu związanego z istotną zmianą ilościową i jakościową w układzie atmosferycznym nad Polską w dniach 23-25.01.2012.

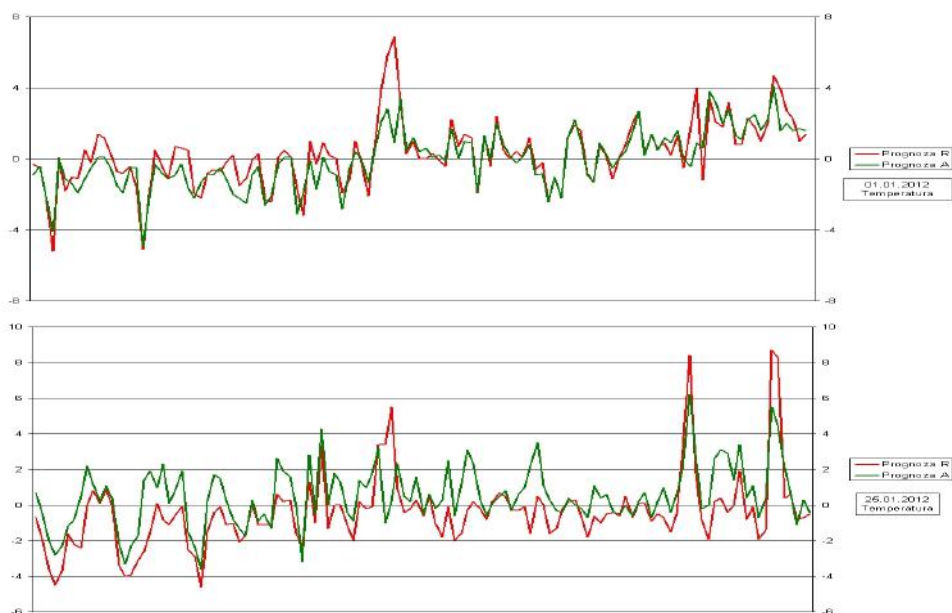
W okresie poprzedzającym zmianę, tzn. od 20.12.2011 do 23.01.2012 nad Polską dominowała zachodnia cyrkulacja strefowa, charakteryzująca się napływem stosunkowo ciepłych i wilgotnych polarno-morskich mas powietrza. Po 25 stycznia nad Polską rozwinęła się sytuacja charakterystyczna dla blokady wyżowej z napływem mroźnych i suchych kontynentalnych mas powietrza. W związku z tym interesujące stało się porównanie wpływu asymilacji danych na jakość prognoz dla różnych reżimów pogodowych. Na rysunku 8 przedstawiono różnice wartości temperatury i prędkości wiatru zmierzonych na stacjach w wybranych dniach (01.01.2012 oraz 25.01.2012) i prognozowanych z wykorzystaniem modelu numerycznego bez oraz z użyciem asymilacji danych. Warto zwrócić uwagę (rys. 8), iż asymilacja danych pozwala na – zgodnie z założeniem – lepsze „dopchnięcie”<sup>3</sup>

---

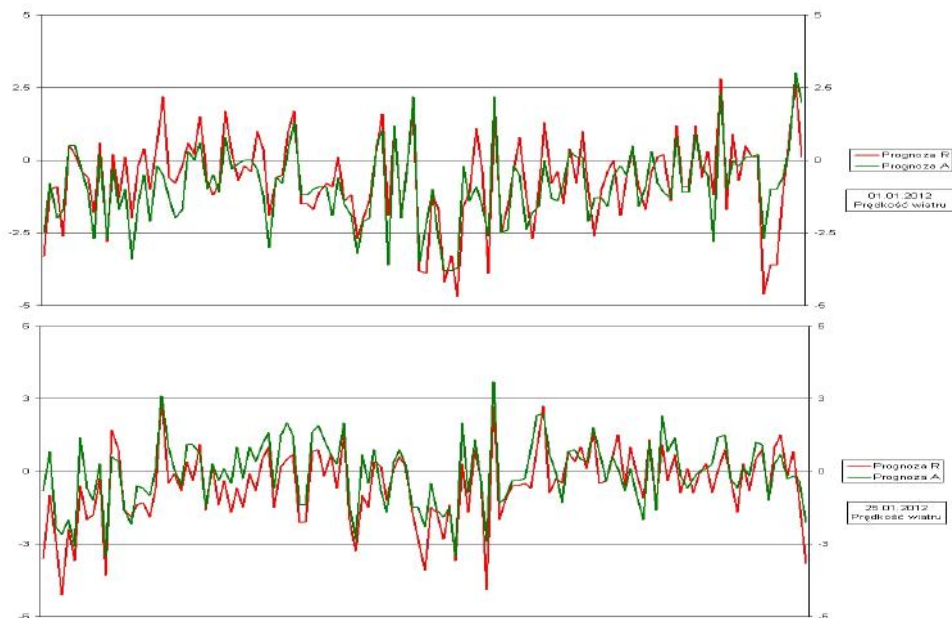
<sup>3</sup> *Nudging* – (ang.) pchanie



prognozy do wyników pomiarów, zwłaszcza w przypadku wartości pomiarowych typu maksimum czy minimum.

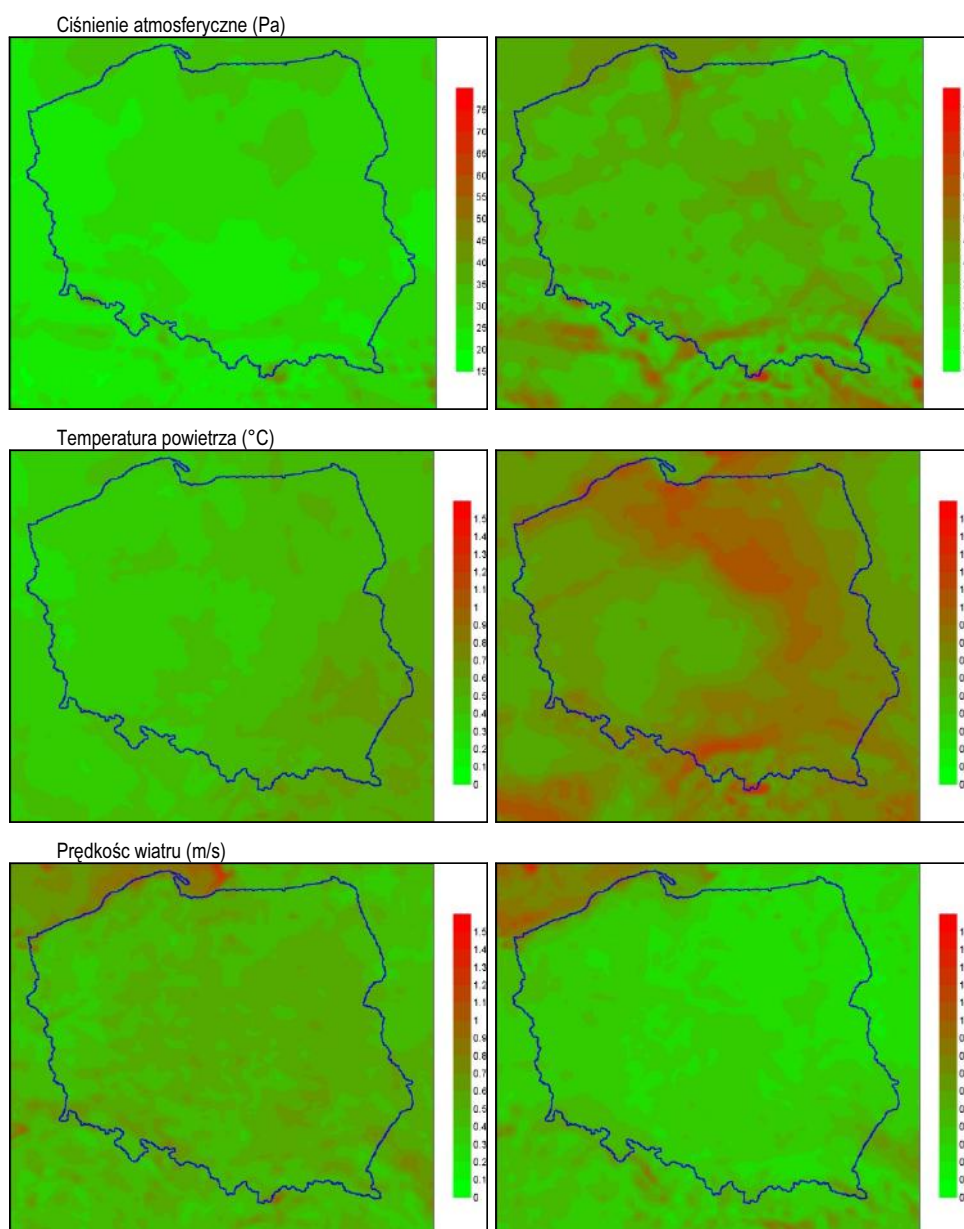


Rys. 8a. Wartości różnic między wartościami temperatury powietrza (°C) mierzonymi na stacjach synoptycznych i prognozowanymi bez użycia (*Prognoza R*) i z wykorzystaniem AD (*Prognoza A*) (górny panel – wartości z dnia 01.01.2012, dolny panel – z dnia 25.01.2012, godzina 00 UTC)



Rys. 8b. Wartości różnic między wartościami prędkości wiatru (m/s) mierzonymi na stacjach synoptycznych i prognozowanymi bez (*Prognoza R*) i z użyciem AD (*Prognoza A*) (górny panel – wartości z dnia 01.01.2012, dolny panel – z dnia 25.01.2012, godzina 00 UTC)

Z kolei na rys. 9 przedstawiono uśrednione w czasie różnice między wartościami prognozowanych elementów meteorologicznych (ciśnienia, temperatury i prędkości wiatru) bez i z użyciem asymilacji danych – w okresie od 20.12.2011 – 25.01.2012 oraz 25.01.2012 – 10.02.2012 (czyli przed i po tej dacie).



Rys. 9. Uśrednione względem czasu różnice między prognozowanymi bez wykorzystania i z użyciem asymilacji danych wartościami ciśnienia atmosferycznego, temperatury powietrza oraz prędkości wiatru w okresie 20.12.2011 – 25.01.2012 (z lewej) oraz 25.01.2012 – 10.02.2012 (z prawej)

Dla każdego parametru widoczne są jakościowe zmiany między tymi okresami. I tak, w przypadku ciśnienia atmosferycznego w okresie po 25 stycznia widać większe rozbieżności między prognozami bez i z wykorzystaniem asymilacji danych, zwłaszcza na południu kraju, na obszarach podgórskich, jak również na wschodnim i centralnym wybrzeżu Bałtyku. Podobnie, choć może w większym stopniu (uwzględniając różnice względne) wygląda obraz dla prognoz temperatury powietrza, gdzie różnice są również większe dla okresu blokady wyżowej.

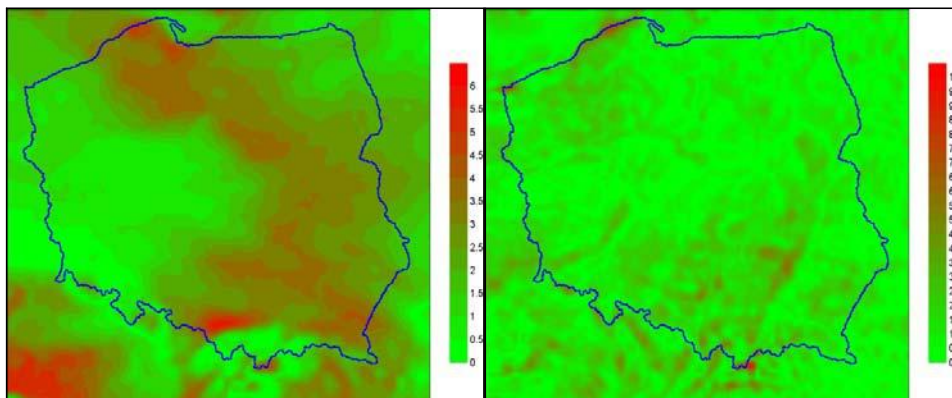
W przypadku prognozowanej prędkości wiatru sytuacja wydaje się ulegać niejakiemu odwróceniu. Wprawdzie w części zachodniej obszaru Morza Bałtyckiego i Wybrzeża różnice są zdecydowanie wyraźniejsze i większe w okresie po 25 stycznia, to nad łądem i wschodnią częścią Bałtyku większe różnice występują w okresie występowania cyrkulacji strefowej. Również charakter tych różnic (jeśli chodzi o rozkład przestrzenny) jest po 25 stycznia mniej zróżnicowany przestrzennie, a bardziej związany z poszczególnymi rejonami geograficznymi.

Analiza wartości zaprezentowanych w tab. 4 wskazuje na istotny – aczkolwiek zgodny z założeniami i oczekiwany – fakt, iż zastosowanie asymilacji danych obserwacyjnych pozwoliło na polepszenie statystyki prognoz w obu okresach, podczas gdy statystyki prognoz referencyjnych – bez wykorzystania asymilacji danych – uległy pogorszeniu w okresie blokady wyżowej. Wszystkie parametry statystyczne (w tym zwłaszcza minimalne, maksymalne i średnie różnice) prognoz wykonywanych z wykorzystaniem asymilacji danych są nieco lub znacząco lepsze niż prognoz wykonywanych bez asymilacji danych.

Tab. 4. Statystyki różnic między wartościami ciśnienia atmosferycznego (hPa), temperatury powietrza (°C) i prędkości wiatru (m/s), mierzonymi na stacjach i prognozowanymi bez użycia i z wykorzystaniem analizy danych w okresie przed i po 25.01.2012

Element meteorologiczny	Statystyka	Przed 25.01.12		Po 25.01.12	
		Bez AD Prognoza R	AD Prognoza A	Bez AD Prognoza R	AD Prognoza A
Ciśnienie	Średnia	-1,6	-1,1	-2,1	-1,9
	Mediana	-0,2	-0,1	-0,5	-0,1
	Odchylenie standardowe	10,1	10,1	12,4	12,1
	Wariancja	26,9	25,2	33,9	28,2
	Minimum	-11,5	-10,1	-15,5	-12,5
	Maksimum	10,5	7	13,5	9,1
Temperatura	Średnia	1,0	0,2	1,2	0,2
	Mediana	0,8	0,2	0,9	0,2
	Odchylenie standardowe	2,0	1,8	2,4	1,9
	Wariancja	3,2	3,1	3,6	3,2
	Minimum	-9,5	-6,3	-11,5	-8,3
	Maksimum	11,1	8,6	15,1	11,6
Prędkość wiatru	Średnia	-0,3	-0,1	-0,5	-0,2
	Mediana	-0,3	-0,1	-0,5	-0,4
	Odchylenie standardowe	2,6	2,1	2,9	2,6
	Wariancja	6,8	5,5	7,6	5,9
	Minimum	-8,1	-3,6	-10,0	-8,6
	Maksimum	9,5	6,1	14,2	9,2

Na koniec, na rys. 10 przedstawiono rozkłady różnic między wartościami temperatury i prędkości wiatru, prognozowanymi bez użycia i z użyciem asymilacji danych, w dniach kiedy różnice te były największe.



Rys. 10. Maksymalne różnice między prognozowanymi wartościami temperatury powietrza (°C; lewy panel) i prędkości wiatru (m/s; prawy panel) bez wykorzystania i z użyciem asymilacji danych (05.02.2012).

Z rysunków 9 i 10 wynika, że chociaż okres trwania cyrkulacji blokadowej był krótszy niż cyrkulacji strefowej, to wyraźniej widać stosunkowo większy wpływ wykorzystania asymilacji danych na prognozy w tym okresie, ponieważ właśnie wtedy wystąpiły największe różnice między prognozami bez i z asymilacją. Z rysunku 10 wynika, że największe różnice prognozy temperatury występują w obszarze dorzecza, a nawet doliny Wisły i Sanu oraz wschodniego wybrzeża Bałtyku i zachodniej części Czech. Warto też zwrócić uwagę na przypadek prognoz ciśnienia atmosferycznego. Z tabeli 4 wynika, że przed 25 stycznia odchylenie standardowe różnicy prognoza – obserwacja są identyczne zarówno przy wykorzystaniu, jak i bez użycia asymilacji danych (choć inne statystyki są lepsze dla prognozy z zastosowaniem asymilacji danych). Natomiast po tej dacie, czyli po napływie mroźnych mas powietrza, parametr ten wzrósł w większym stopniu dla prognoz bez użycia asymilacji danych niż przy wykorzystaniu asymilacji danych.

## 6. Podsumowanie

W Dziale Numerycznych Prognoz Meteorologicznych COSMO Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego były prowadzone prace i badania mające na celu wdrożenie i operacyjne wykorzystanie cyklu analizy opartego na asymilacji obserwacji do modelu COSMO metodą *nudgingu*. W założeniach projektowych i realizacji cykl analizy jest wzorowany na rozwiązaniach stosowanych w DWD oraz MeteoSwiss. Zasadniczym elementem cyklu jest wykorzystanie odświeżanych prognoz z modelu globalnego jako źródła warunku brzegowego dla przebiegów analizy. System ten, pracujący w IMGW, wykazał swoją przydatność w generowaniu dokładniejszych i wiarygodniejszych prognoz w realnym trybie operacyjnym.

Uzyskane wyniki pozwolą na lepsze wykorzystanie najnowocześniejszych metod i technik prognozowania numerycznego do prowadzenia osłony przed groźnymi zjawiskami pogodowymi, a także na dalszy rozwój metodologii prognoz i ostrzegania przed tymi zjawiskami. Rozwój ten jest niezbędny do utrzymania dobrego poziomu współpracy między IMGW-PIB a europejskimi służbami meteorologicznymi w dziedzinie metod prognozowania oraz do adaptowania nowych metod na potrzeby operacyjnej osłony meteorologicznej.

### **Literatura**

- Basler+Partner (pr. zbiorowa), 2008, GloBUS User Manual, Basler+Partner GmbH
- Basler+Partner (pr. zbiorowa), 2009, Sky User Manual, Basler+Partner GmbH
- Daley R., 1991, Atmospheric Data Analysis, Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press
- Doms G., 2011, A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part I. Dynamics and Numerics. DWD documents
- Doms G. i in., 2011. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part II. Physical Parameterization. DWD documents
- Kalnay E., 2001, Numerical weather forecasting and predictability. Cambridge Univ. Press, 2001
- Nielsen-Gammon J.W., Strack J., 2000, Model resolution dependence of simulation of extreme rainfall events ([www.mmm.edu/mm5/workshop](http://www.mmm.edu/mm5/workshop))
- Nurmi P., 2003, Recommendations on the verification of local weather forecasts. ECMWF Library. Series: ECMWF Technical Memoranda. Technical Memorandum No. 430
- Palmer T.N., 2003, Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate, Meteorological Training Course Lecture Series, ECMWF
- Schaettler U., 2009, A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part V. Preprocessing: Initial and Boundary Data for the COSMO-Model. DWD documents
- Schaettler U., Doms G., Schraff C., 2009, A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part VII. User Guide. DWD documents
- Schaettler U., Schraff C., 2009, komunikacja osobista
- Schraff C., Hess R., 2003, A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part III. Data Assimilation. DWD documents
- Verification forecasts using up-scaled observations, 2000, ECMWF Newsletter No. 87 Spring

# **System numerycznego prognozowania wysokiej rozdzielczości**

*Małgorzata Szczęch-Gajewska, Marcin Kolonko, Marek Jerczyński*

## **1. Wstęp**

Procesy konwekcyjnoskalowe, czyli te, dla których adekwatne skale przestrzenne są rzędu kilometrów, a skale czasowe rzędu minut, należą do grupy procesów o znaczącym wpływie na działalność gospodarczą i społeczną człowieka. Przede wszystkim należy wymienić wśród nich procesy głębokiej konwekcji prowadzące do takich zjawisk jak ekstremalne opady, intensywne wyładowania czy silne porywy wiatru. Inną, istotną grupę procesów typowych dla tej skali stanowią procesy związane z wymuszeniem orograficznym i lokalnymi procesami wymiany podłoże – atmosfera prowadzące np. do formowania się i dyssypacji mgły. Mezoskalowe modele prognozy pogody pracujące na siatkach o rozdzielczości rzędu 10 km nie były w stanie wiarygodnie prognozować tego typu zjawisk.

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB), aby sprostać wyzwaniom osłony meteorologicznej kraju uczestniczy w pracach międzynarodowego konsorcjum ALADIN ([www.cnrm.meteo.fr/aladin](http://www.cnrm.meteo.fr/aladin)), które rozwija m.in. konwekcyjnoskalowy prognostyczny model numeryczny AROME. Model ten należy do najbardziej efektywnych obliczeniowo w swojej klasie. W ramach realizacji zadania 5.3 projektu KLIMAT „Rozwój metod prognozowania numerycznego o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej” model AROME został zainstalowany w krajowym ośrodku obliczeniowym ACK CYFRONET, zaadaptowany dla lokalnych potrzeb i uruchomiony w reżimie quasi-operacyjnym w listopadzie 2011. Pracom tym towarzyszyło stworzenie systemu weryfikacji wysokiej rozdzielczości opartego na metodach rozmytych oraz dedykowanego systemu wizualizacji danych meteorologicznych.

## **2. Model AROME**

Zadania współczesnej osłony meteorologicznej wymagają stosowania coraz bardziej zaawansowanych technologicznie systemów obserwacyjnych i prognostycznych. Z tego też powodu w wiodących ośrodkach meteorologicznych rozwija się i wprowadza się do eksploatacji modele numerycznej prognozy pogody nowej

generacji, modele wysokiej rozdzielczości. Wśród tych ośrodków jest też Meteo-France i w coraz większym zakresie pozostałe służby członkowskie konsorcjum ALADIN. Meteo-France decydując się na stworzenie modelu konwekcyjnoskalowego dysponowało już operacyjnym modelem mezoskalowym ALADIN oraz modelem badawczym Meso-NH. Nowy model zbudowano wykorzystując wybrane elementy obu: z modelu ALADIN pakiet dynamiki niehydrostatycznej oraz pakiet wariacyjnej asymilacji danych, a z modelu Meso-NH pakiety parametryzacji procesów fizycznych. Fuzja obu rozwiązań wymagała licznych adaptacji i opracowania odpowiednich interfejsów. Nowy model nazwano AROME (*Applications de la Recherche a l'Operationnel a Meso-Echelle*).

Model AROME jako model prognozy pogody wysokiej rozdzielczości rozwiązuje układ równań dynamiki niehydrostatycznej wykorzystując reprezentację spektralną pól. W modelu są wykorzystywane zaawansowane parametryzacje procesów fizycznych, w tym:

- parametryzacja procesów mikrofizycznych ICE-3 (3 *ice precipitation categories* [Pinty, Jabouille 1998], z pięcioma hydrometeorami i stochastyczną sedymentacją;
- parametryzacja procesów powierzchniowych oparta na eksternalizowanym pakiecie modułów SURFEX, którego jądrem jest moduł parametryzacji ISBA (*Interactions Soil-Biosphere-Atmosphere* [Noilhan, Planton 1989]), własności gruntu pochodzą z bazy fizjograficznej ECOCLIMAP o rozdzielczości 1 km;
- parametryzacja warstwy granicznej oparta na schemacie Bougeault'a-Lacorre'a i zmiennej prognostycznej turbulencyjnej energii kinetycznej TKE (*Turbulent Kinetic Energy* [Cuxart 2000]);
- parametryzacja promieniowania – krótkofalowa część widma opisana za pomocą modułu FM (Fouquart-Morcrette) wykorzystującego 6 pasm widmowych [Fouquart, Bonnel 1980, Morcrette 1990]; część długofalowa widma opisana przez schemat RRTM (*Rapid Radiative Transfer Model*), z uwzględnieniem oddziaływania z warstwą ozonową i aerozolami troposferycznymi i stratosferycznymi [Mlawer et al. 1997];
- parametryzacja płytkiej konwekcji wykorzystująca schemat EDMF (*Eddy Diffusivity–Mass Flux* [Pergaud et al. 2009]).

Procesy adwekcji są natomiast rozwiązywane z wykorzystaniem późniejszego semi-lagranżowskiego schematu całkowania. AROME wykorzystuje wariacyjną metodę asymilacji danych 3D - VAR - FGAT (*3-Dimensional VARIational data assimilation in First Guess at Appropriate Time configuration*). Model pracuje z danymi ze stacji naziemnych, sondaży atmosferycznych oraz z danymi szeregu systemów teledetekcji satelitarnej i radarowej. Więcej informacji na temat modelu można znaleźć w pracy [Seity et al. 2010].

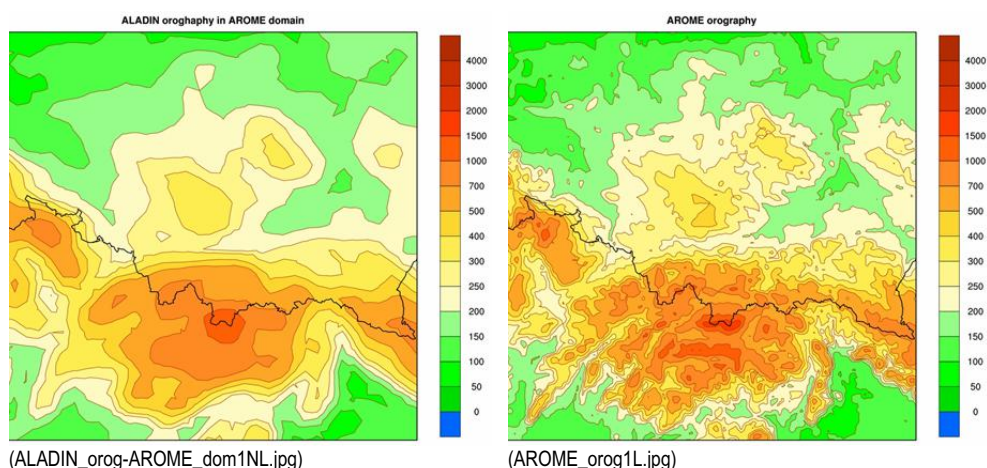
### **3. Ocena przydatności modelu AROME**

W ramach zadania 5.3 projektu KLIMAT zaplanowano przygotowanie modelu AROME do eksploatacji w krajowym ośrodku obliczeniowym na potrzeby pol-



skiej służby meteorologicznej. W tym celu dokonano instalacji modelu, jego adaptacji do lokalnych warunków, wszechstronnej walidacji przygotowanej konfiguracji oraz uruchomiono wielomiesięczne testy quasi-operacyjne. Działania te miały przede wszystkim umożliwić ocenę przydatności wspomnianego modelu w zadaniach osłony meteorologicznej realizowanej przez polską służbę meteorologiczną, ale także ocenę niezbędnych do jego operacyjnej eksploatacji zasobów informacyjnych oraz rozpoznanie potencjalnych zagrożeń dla niezawodności eksploatacji systemu prognostycznego opartego na modelu AROME.

Model został zainstalowany w ACK CYFRONET na maszynie SGI ALTIX 3700 w konfiguracji cechującej się wielkością siatki obliczeniowej 180x180x49 węzłów, rozdzielczością przestrzenną 2,7 km, krokiem czasowym 60 s oraz 30-godzinnym horyzontem prognozy. Stosunkowo nieduża domena objęła rejon południowo-wschodniej Polski. Na rysunku 1 przedstawiono odwzorowania orografii operacyjnej konfiguracji modelu ALADIN o rozdzielczości 13,5 km oraz omawianej konfiguracji modelu AROME na obszarze domeny modelu AROME.



Rys. 1. Orografia modelu ALADIN (lewy panel) i AROME (prawy panel) w domenie modelu AROME

Walidacja uruchomionej konfiguracji modelu AROME objęła jakościowe i ilościowe porównanie prognoz konwekcyjnoskalowego modelu AROME i subsynoptycznoskalowego ALADIN z obserwacjami. Tutaj skupimy się na prezentacji wyłącznie wyników porównania jakościowego, wyniki porównania ilościowego można znaleźć w zamieszczonej w niniejszej monografii pracy B. Bochenka i J. Woyciechowskiej. Jakościowe porównanie prognoz obu modeli wymagało przygotowania dedykowanego zespołu baz danych prognostycznych i obserwacyjnych zawierających dane SYNOP, dane z automatycznych stacji pomiarowych sieci ATS, dane z sieci radarowej POLRAD, produkty opadowe oparte na danych radiometru satelitarne SEVIRI. Zgromadzono dane dla kilkunastu interesujących sytuacji meteorologicznych, cechujących się wystąpieniem rozległych, mniej lub bardziej intensywnych, opadów na obszarze domeny modelu AROME. Ze względu

na objętość monografii ograniczymy się tylko do zilustrowania zastosowanej metodologii.

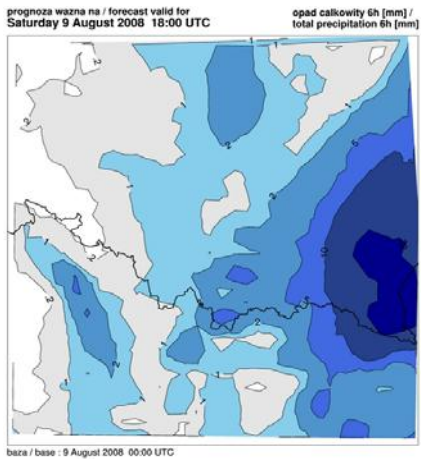
Jedną z wyselekcjonowanych sytuacji meteorologicznych jest przypadek wystąpienia umiarkowanie obfitych opadów na obszarze Bieszczadów w dniu 9 sierpnia 2008. Południowo-wschodnia Polska znajdowała się nadal pod wpływem frontu chłodnego z nad Ukrainy. W tym dniu stacje automatyczne odnotowały w Bieszczadach opad powyżej 40 mm/12 h, natomiast, co ciekawe, radary nie wykazały w tym rejonie takich wysokich opadów. Przyjrzyjmy się przygotowanym wizualizacjom (rys. 2) wyników 18-godzinnych prognoz 6-godzinnej sumy opadów modeli ALADIN i AROME, a także korespondującym danym obserwacyjnym z sieci SYNOP i ATS, z sieci radarów POLRAD – produkt PAC, oraz estymacji opadu opartej na danych radiometru SEVIRI satelity meteorologicznego MSG.

Z porównania przedstawionych obrazów wynika, że model AROME lepiej prognozował wysokość i lokalizację opadu niż model ALADIN. Dotyczy to większości analizowanych przypadków. Dla prezentowanej sytuacji 9 sierpnia 2008 roku warta zauważenia jest znacząca zgodność prognozowanej przez model AROME wysokości opadu z wartościami zarejestrowanymi przez automatyczne stacje meteorologiczne. Porównanie prognozy z obserwacjami SYNOP jest również zadowalające, ale znacząco gęstsza sieć obserwacyjna ATS pozwala także, w pewnych granicach, potwierdzić prognozę struktury pola opadu. Przewaga prognozy modelu AROME uwidacznia się na południu Bieszczadów oraz w rejonie Beskidu Żywieckiego, podczas gdy dla Tatr i Beskidu Niskiego prognozy obu modeli są zbliżone.

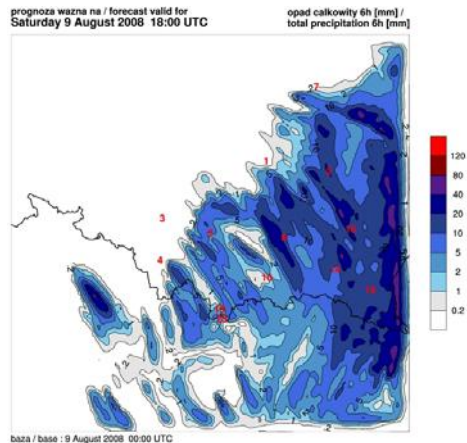
Na południu Bieszczadów prognoza konwekcyjnoskalowa pokazuje opad w granicach 10-40 mm i znajduje to potwierdzenie w danych obserwacyjnych stacji ATS, które zarejestrowały opady w granicach 16-33 mm. Prognoza subsynoptycznoskalowa daje inny rozkład opadu. Wyraźnie lepsza jest prognoza modelu AROME dla Beskidu Żywieckiego. Stacje pomiarowe zarejestrowały opad wysokości do kilkunastu milimetrów, podczas gdy dla bezpośredniego otoczenia tych stacji prognozowany był opad rzędu 10-20 mm. Interesujące jest to, że dane teledetekcji radarowej i satelitarnej lokują inaczej niż obserwacje *in situ* i prognozy numeryczne wystąpienie zwartego obszaru wystąpienia średnich i wysokich opadów – jest on przesunięty w kierunku zachodnim.

Porównano także prognozy modelu AROME dla szeregu innych pól meteorologicznych. Na rysunku 3 przedstawiono przykłady map prognostycznych (prognozy 18-godzinne) z naniesionymi wartościami obserwacji SYNOP dla 9 sierpnia 2008 - prognozy wilgotności względnej na 2 m oraz temperatury na 2 m na godz. 18 UTC. Widzimy dobrą zgodność prognozy z obserwacjami.

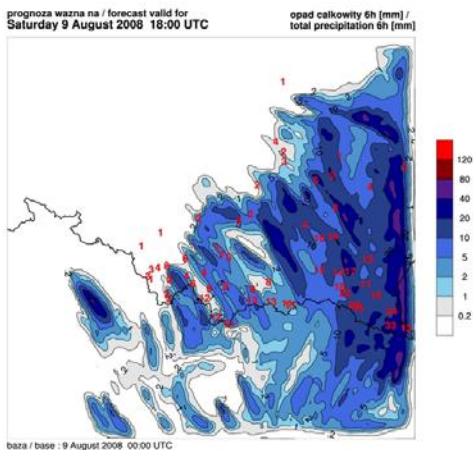
W związku z obserwowanymi zmianami klimatu i częstszymi wystąpieniami groźnych zjawisk atmosferycznych wzrasta znaczenie modeli konwekcyjnoskalowych w zadaniach osłony meteorologicznej. W celu oceny przydatności modelu AROME do tych zadań przeprowadzono także jakościową analizę jego prognoz dla sytuacji meteorologicznych cechujących się występowaniem burz, intensywnych opadów, także opadów gradu. W tym celu prognozy modelu konwekcyjnoskalowego



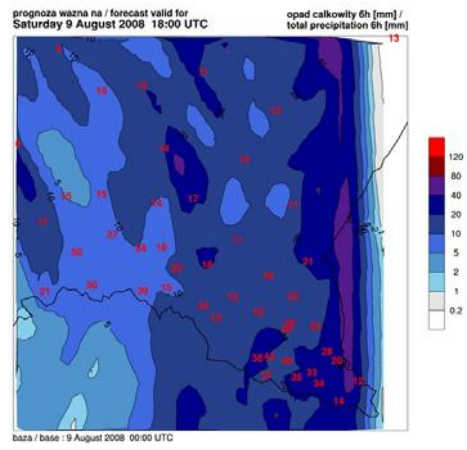
ALADIN w domenie AROME (ALD\_20080809\_surf\_cum1218\_opad.jpg)



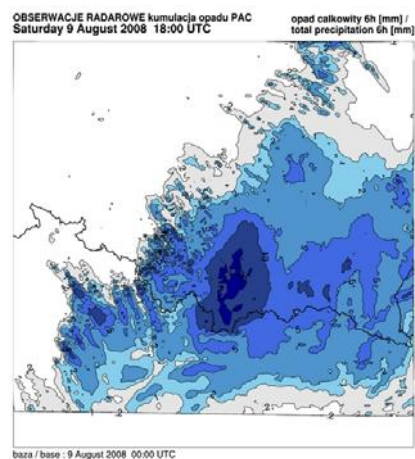
SYNOP vs. AROME (SYNOP\_20080809\_surf\_cum1218\_opad.jpg)



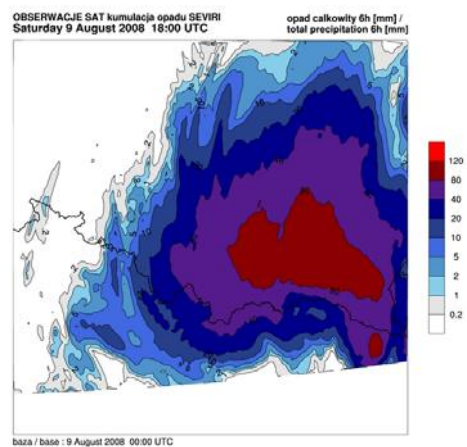
ATS vs. AROME (ATS\_20080809\_surf\_cum1218\_opad.jpg)



ATS vs. AROME – Bieszczady  
(ATS\_20080809\_surf\_cum1218\_opadBiesz1.jpg)

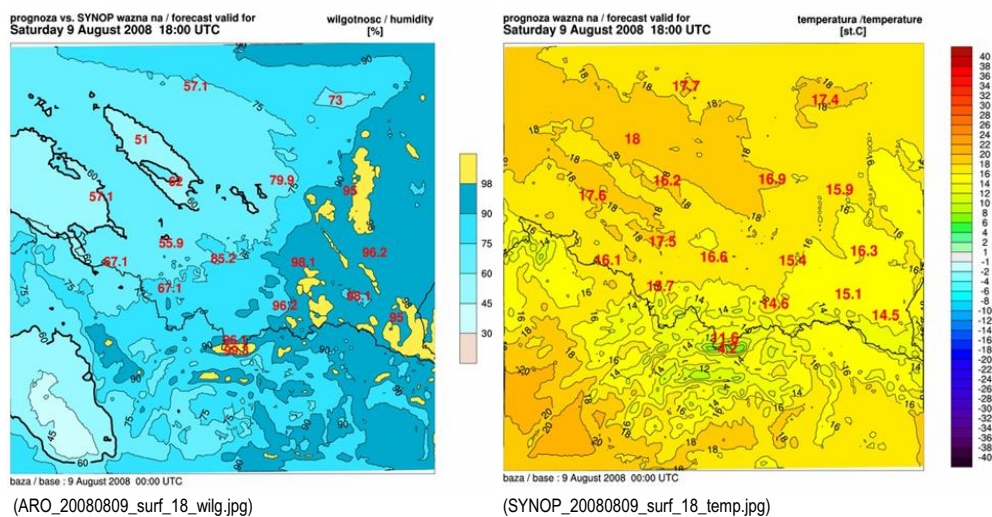


Radary – PAC (RAD\_20080809\_cum1218\_PAC.jpg)

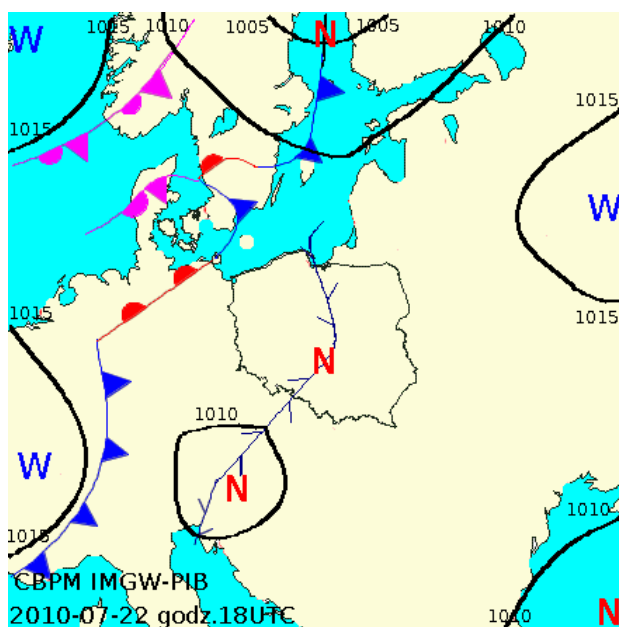


Opad skumulowany na podstawie danych SEVIRI  
(SAT\_20080809\_cum1218\_SEVIRI.jpg)

Rys. 2. Sytuacja z 9 sierpnia 2008 r. 6-godzinne kumulacje opadu [mm] Prognoza ALADIN (lewy górny panel) i AROME (prawy górny panel) w porównaniu z obserwacjami z ATS (środkowy panel) oraz z radarów (lewy dolny panel) i danymi satelitarnymi (prawy dolny panel)



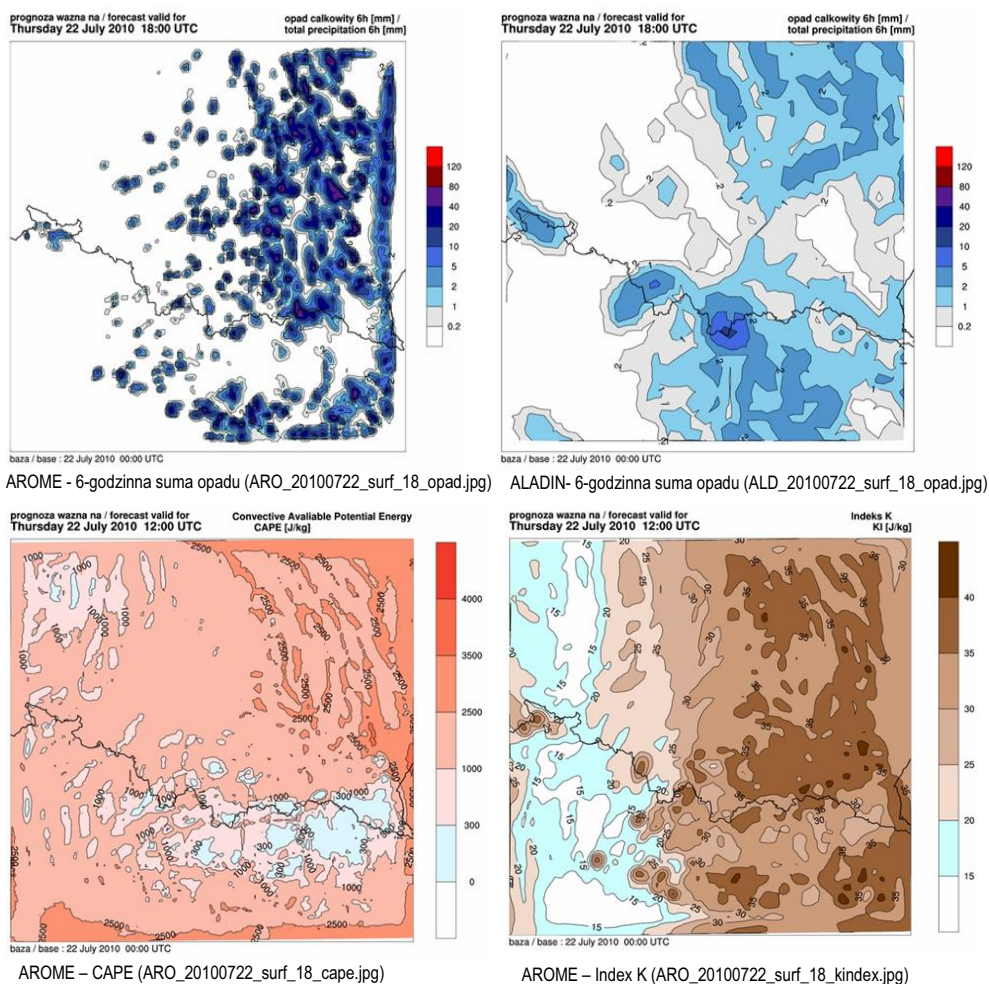
Rys. 3. Pola wilgotności względnej [%] (lewy panel) i temperatury [°C] (prawy panel) na wysokości 2 m dla modelu AROME z naniesionymi danymi z obserwacji ze stacji synoptycznych dla godz. 18 UTC dnia 9 sierpnia 2008.



Rys. 4. Mapa sytuacji synoptycznej z 22.07.2010 18 UTC (R. Kaseja 2012, Centralne Biuro Prognoz Meteorologicznych Kraków, IMGW-PIB, mapa\_mk5.gif)



wego porównano z danymi SYNOP dla grupy wyselekcjonowanych przypadków. Poddano analizie prognozy opadów, zachmurzenia, w tym zachmurzenia pochodzenia konwekcyjnego, oraz wskaźników burzowych K-Index i CAPE. Przypomnijmy, że K-Index niesie informację o potencjalnej niestabilności w dolnej części troposfery i jest użyteczny przy prognozowaniu burz. Jego wartości powyżej 30°C wskazują na ponad 60% prawdopodobieństwo wystąpienia burz, a powyżej 40°C na prawie 100%. Natomiast CAPE (*Convective Available Potential Energy*) jest podstawowym wskaźnikiem potencjalnej intensywności głębokiej wilgotnej konwekcji. Wartości CAPE powyżej 1000 J/kg wskazują na możliwość wystąpienia umiarkowanej konwekcji, natomiast powyżej 2500 J/kg – już na silną konwekcję.



Rys. 5. Prognoza modelu AROME (lewy górny panel: 6-godzinną sumą opadu [mm], lewy dolny panel: CAPE [J/kg], prawy dolny panel: K Index [J/kg]) i ALADIN (prawy górny panel: 6-godzinną sumą opadu [mm]).

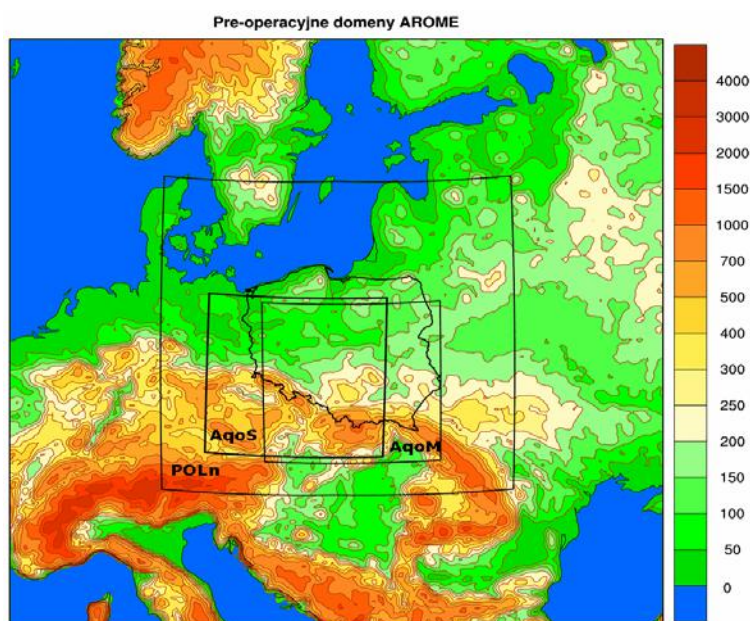
W celu ilustracji możliwości modelu AROME w prognozowaniu groźnych zjawisk meteorologicznych przyjrzyjmy się wynikom prognozy dla sytuacji z dnia 22 lipca 2010 (rys. 4). Nad Polską południowo-wschodnią zalegała masa powietrza zwrotnikowego, w której rozwinęła się wewnątrzmasowa aktywność burzowa dodatkowo wspierana obecnością linii zbieżności i formującego się płytkiego ośrodka niżowego. Na stacji synoptycznej w Krośnie o godz. 13 UTC została zaobserwowana burza z gradem. Model AROME nie prognozował opadów gradu na obszarze domeny, ale na całym obszarze południowo-wschodniej Polski prognozował liczne wystąpienia intensywnych opadów pochodzenia konwekcyjnego (rys. 5). Prognozowany przez model AROME dla Krosna na godzinę 12 UTC indeks stabilności K-Index = 38,9°C wskazywał na prawie 100% prawdopodobieństwo wystąpienia w okolicy burz. Natomiast prognozowana dla wspomnianej lokalizacji wartość wskaźnika CAPE = 1552 J/kg, a lokalnie w bliskim sąsiedztwie powyżej 2500, a nawet powyżej 3500 J/kg (rys. 5) wskazywała na możliwość wystąpienia umiarkowanie intensywnej i lokalnie intensywnej głębokiej konwekcji. Na uwagę zasługuje też fakt, że model AROME, w odróżnieniu od modelu ALADIN, trafnie pokazał, że w omawianej sytuacji synoptycznej struktura pola opadu będzie miała charakter „grona”. Na załączonych obrazach nietrudno zauważyć w pobliżu brzegu obecność artefaktów, jednak bliższa analiza nie wykazuje, by w zauważalny sposób wpływały na prognozę poza obszarem występowania. Podsumowując, można stwierdzić, że jakościowe porównanie wyników prognozowania wysokiej rozdzielczości i danych sieci obserwacyjnej SYNOP pokazało, że model AROME dał poprawny obraz sytuacji. Ta konkluzja dotyczy też innych analizowanych przypadków.

#### **4. Quasi-operacyjne testy modelu AROME**

Do operacyjnego wykorzystania modeli pracujących z rozdzielczością poziomą 1-3 km konieczne jest dysponowanie znacznymi zasobami obliczeniowymi, wielokrotnie większymi niż jest to niezbędne w eksploatacji modeli subsynoptycznoskalowych. Próbą obejścia tego problemu jest ograniczenie wielkości domeny obliczeniowej modelu konwekcyjnoskalowego, co jednak pociąga za sobą konieczność skrócenia horyzontu czasowego prognozy. Jest to powód, dla którego modele konwekcyjnoskalowe mimo wyraźnie lepszej dokładności ich prognoz nie mogą być obecnie jedynymi modelami prognostycznymi wykorzystywanymi do rutynowej osłony meteorologicznej. Nadal niezbędne są modele subsynoptycznoskalowe pozwalające prognozować pogodę na większych obszarach i z dłuższym horyzontem czasowym.

Końcowym etapem prac było przygotowanie quasi-operacyjnej wersji systemu prognostycznego opartego na modelu AROME i przeprowadzenie symulacji jego eksploatacji operacyjnej. Dla potrzeb testów przygotowano dwie nowe konfiguracje modelu AROME dedykowana do osłony meteorologicznej Małopolski oraz Śląska. Obie cechują się rozdzielczością przestrzenną 2,7 km, 30-godzinnym horyzontem prognozy i siatką obliczeniową o rozmiarach 229x229x49. Konfiguracja

“AqoM” obejmuje domenę z centrum o współrzędnych 19°48"E i 50°48"N, a konfiguracja “AqoS” – z centrum o współrzędnych 17°E i 51°N. Dla każdej domeny przygotowano też niezbędne dane klimatyczne i fizjograficzne. Ponadto przygotowano konfigurację docelową modelu AROME o analogicznej rozdzielczości i domenie o rozmiarach 1200 km x 1200 km, pozwalającą na osłonę całego terytorium Polski. Obecnie jej wykorzystanie nie jest jednak możliwe ze względu na brak wystarczających zasobów informatycznych.



Rys. 6. Domeny dwóch quasi-operacyjnych konfiguracji modelu AROME i domena operacyjnej konfiguracji modelu ALADIN na tle mapy hipsometrycznej Europy Środkowej [m n.p.m.] (domainsAROMEoper.gif)

Testy quasi-operacyjne modelu AROME przeprowadzono na superkomputerze SGI Altix 3700 w centrum obliczeniowym ACK CYFRONET. Przygotowano niezbędne środowisko operacyjne i oprogramowanie sterujące automatyczną pracą systemu progностycznego, tj.:

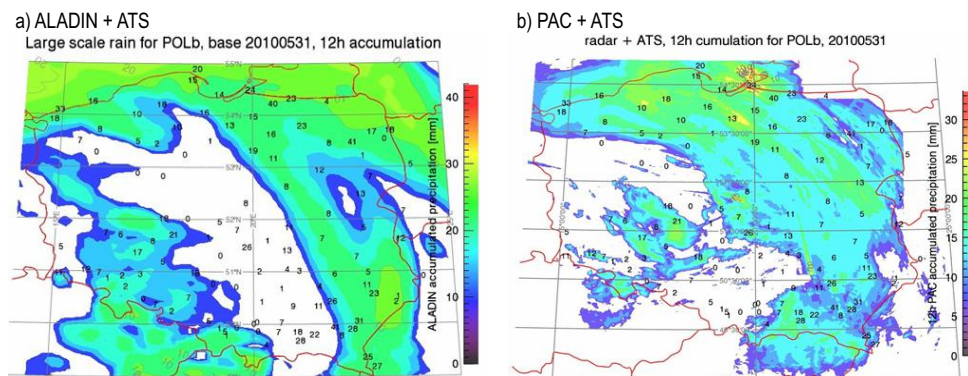
- oprogramowanie pobierające i kontrolujące poprawność pobrania warunków brzegowych i początkowych;
- oprogramowanie uruchamiające i kontrolujące przebieg konfiguracji modelu konwertującej warunki brzegowe do geometrii modelu AROME oraz uzupełniające warunki początkowe o pola w nich nieobecne (np. ozon), a także przygotowujące dodatkowy plik z warunkami początkowymi dla pakietu procesów powierzchniowych SURFEX;
- oprogramowanie uruchamiające i kontrolujące przygotowanie prognozy modelu AROME z określonym krokiem czasowym i dla zadanego horyzontu prognozy;



- oprogramowanie konfiguracji modelu przygotowującej i kontrolującej przebieg przetwarzania końcowego wyników prognozy AROME;
- skrypty sterujące archiwizacją wyników poszczególnych etapów przygotowania prognozy.

Quasi-operacyjne testy są prowadzone na ograniczonej liczbie procesorów: 12 procesorów Intel Itanium2. Przygotowanie 30-godzinnej prognozy dla jednej domeny trwa ok. 3 godzin i 50 minut. Testy są uruchamiane raz dziennie, a wyniki nie są archiwizowane – pliki wynikowe to około 3,2 GB.

Niezbędnym elementem środowiska modelu prognostycznego jest system przetwarzania końcowego wyników, w tym ich wizualizacji. Dlatego w ramach realizowanych prac przygotowano system automatycznej wizualizacji oparty na pakiecie IDL. Program ten to narzędzie dające szereg zaawansowanych możliwości transformacji i prezentacji danych oraz umożliwiające przygotowanie złożonych produktów wizualizacji za pomocą wyspecjalizowanego języka IDL [Glatz 2010]. Opracowany i przygotowany system automatycznej wizualizacji to zestaw skryptów we wspomnianym języku pozwalających na produkcję szerokiego spektrum map kompozytowych pól meteorologicznych pochodzących z różnych meteorologicznych systemów prognostycznych lub obserwacyjnych. Pozwala m.in. na łączną prezentację wyników modeli ALADIN i AROME, danych radarowych sieci POLRAD, danych teledetekcji satelitarnej i danych ze stacji synoptycznych oraz automatycznych stacji opadowych (ATS).



Rys.7. 12-godzinna kumulacja opadu (6-18 UTC 31/5/2010): a) dla modelu ALADIN [mm] i ze stacji automatycznych ATS; b) ze stacji radarowych i danych z ATS [mm]

W celu prezentacji możliwości omawianego systemu przygotowano mapy dla sytuacji powodziowej z 31 maja 2010. Na rysunku 7a przedstawiono dane (12-godzinną sumę opadu) z modelu ALADIN oraz dane z sieci stacji automatycznych ATS. Rysunek 7b pokazuje tę samą wielkość zmierzoną przez system POLRAD i stacje ATS. Opracowane produkty kompozytowe stworzone za pomocą pakietu IDL umożliwiają efektywne, subiektywne porównywanie danych pochodzących z różnych źródeł, umożliwiając m.in. ocenę jakościowej zgodności numerycznych prognoz pogody i obserwacji. Daje to dodatkową kontrolę poprawności pracy

wdrażanych, nowych wersji modeli prognostycznych, a także wzbogaca paletę udostępnianych operacyjnie produktów prognostycznych.

## 5. Podsumowanie

Wysoka rozdzielczość przestrzenna konwekcyjnoskalowego modelu AROME oraz jego znacznie rozbudowana parametryzacja procesów fizycznych w stosunku do obecnie eksploatowanego operacyjnie w IMGW-PIB subsynoptycznoskalowego modelu ALADIN pozwala na zauważalne podniesienie jakości prognoz meteorologicznych, co w wyniku wykonanych w ramach realizacji zadania 5.3, testów i analiz udało się potwierdzić (porównaj także wyniki ilościowej weryfikacji prognoz modeli ALADIN i AROME przedstawione w niniejszej monografii: Woyciechowska, Bochenek 2012). Pozwala to w modelu AROME upatrywać następcę modelu ALADIN w prognozowaniu zjawisk atmosferycznych mających znaczny wpływ na istotne sfery działalności gospodarczej i społecznej. Jednak w praktyce operacyjnego wykorzystania modeli prognozy pogody istotną rolę grają koszty obliczeń, a te w przypadku modelu konwekcyjnoskalowego są wysokie. W celu optymalizacji kosztów wykorzystuje się powszechnie kaskadę modeli o różnej rozdzielczości przestrzennej i różnych parametryzacjach, obsługujących wybrane domeny. Łączne użycie modeli subsynoptycznoskalowego i konwekcyjnoskalowego w osłonie meteorologicznej terytorium kraju wydaje się właściwym i ekonomicznym rozwiązaniem. Adaptacja modelu AROME, walidacja przygotowanej konfiguracji i uruchomienie modelu w trybie quasi-operacyjnym pokazało, że już obecnie można model tej klasy w ograniczonym zakresie wykorzystać w praktyce osłony meteorologicznej wybranych obszarów Polski, a po uzyskaniu dostępu do większych zasobów obliczeniowych, do operacyjnej osłony całego terytorium kraju.

## Literatura

- Cuxart J., Bougeault P., Redelsberger J.-L., 2000, A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 1-30
- Fouquart, Y., and B. Bonnel, 1980, Computation of solar heating of the earth's atmosphere: A new parameterization, *Beitr. Phys.*, 53, 35-62
- Glatz W., 2010: IDL Intensive Seminar, materiały z kursu
- Mlawer E.J. i in., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102D, 16, 663-16,682
- Morcrette J.-J., 1990, Impact of changes to the radiation transfer parameterizations plus cloud optical properties in the ECMWF model, *Mon. Wea. Rev.*, 118, 847-873
- Noilhan J., Planton S., 1989, A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.* 117, 536-549
- Pergaud J., Masson V., Malardel S., Couvreur F., 2009, A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction. *Bound.-Layer Meteor.*, 132, 83-106
- Pinty J.-P., Jabouille P., 1998, A mixed-phased parameterization for use in a mesoscale non-hydrostatic model: Simulations of a squall line and of orographic precipitation. Preprints, AMS Conference on Cloud Physics, Everret WA, 217-220
- Seity Y. i in., 2010, The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 976-991

# **System weryfikacji rozmytej**

*Bogdan Bochenek, Jadwiga Wojciechowska*

## **1. Wprowadzenie**

Obecnie numeryczne modele prognozy pogody stają się coraz częściej stosowanym narzędziem w centrach prognoz meteorologicznych. Rozwijająca się technologia numerycznego prognozowania i rosnące moce obliczeniowe komputerów pozwalają na stosowanie zaawansowanych modeli prognostycznych o coraz większej rozdzielczości. W wiodących ośrodkach naukowych powstają więc nowe ich generacje, a ewolucji tej towarzyszy rozwój metod i narzędzi weryfikacji prognoz.

W ramach realizacji zadania 5.3 projektu KLIMAT przeprowadzono adaptację modelu konwekcyjnoskalowego AROME dla potrzeb osłony meteorologicznej kraju. Towarzyszyły jej prace nad stworzeniem systemu weryfikacji prognoz wysokiej rozdzielczości opartego na metodach rozmytych. Przygotowanie nowego, adekwatnego systemu weryfikacji było niezbędne, gdyż weryfikacja prognoz wysokiej rozdzielczości klasycznymi metodami prowadzi do paradoksalnego wniosku, że prognozy te mają mniejszą sprawdzalność niż te o mniejszej rozdzielczości. Porównania prognoz konwekcyjnoskalowych z obserwacjami przy użyciu klasycznych metod typu “punkt-punkt” są czułe na niewielkie przesunięcia w czasie i przestrzeni korespondujących struktur, co prowadzi do zaniżania wartości różnych wskaźników jakości prognozy. Zaimplementowane w systemie weryfikacji wysokiej rozdzielczości metody rozmyte nie wykazują wspomnianej wady. Budowa omawianego systemu składała się z następujących etapów: przegląd i wybór konkretnych metod weryfikacji rozmytej, kodowanie wybranych metod, integracja części składowych systemu, optymalizacja oprogramowania oraz przygotowanie i uruchomienie eksploatacji quasi-operacyjnej.

## **2. Wybrane metody i wskaźniki stosowane w weryfikacji rozmytej**

Niewątpliwe atuty metod rozmytych, jakimi są łatwość i efektywność implementacji, sprzyjały ich szybkiemu rozwojowi i szerokiemu wykorzystaniu. W ostatnich latach metodom rozmytym poświęcono wiele prac badawczych, w których zaproponowano szereg ich wersji różniących się zasadami określania

zgodności prognozy z obserwacjami. W metodach rozmytych przedmiotem zainteresowania jest nie różnica prognozowanej i obserwowanej wartości pola meteorologicznego w korespondujących punktach, ale podobieństwo wybranych otoczeń tych punktów. Podobieństwo wspomnianych otoczeń definiujemy wprowadzając adekwatne do potrzeb miary podobieństwa – deterministyczne i probabilistyczne.

Metody weryfikacji rozmytej ze względu na zastosowaną strategię porównania możemy podzielić na dwie grupy [Ebert 2008]. Pierwsza grupa, nazywana często „metodami zorientowanymi na użytkownika”, jest związana z weryfikacją prognoz dla konkretnych punktów – lokalizacji urządzeń pomiarowych. Jej główną zaletą jest bezpośrednie odniesienie się do danych obserwacyjnych zmierzonych przez stacje meteorologiczne. Druga grupa, „metody zorientowane na model”, jest związana z porównaniem wybranych statystyk pola prognozowanego i obserwowanego dla korespondujących grup punktów. Metody tej grupy dobrze nadają się do porównywania prognoz numerycznych z danymi radarowymi lub satelitarnymi.

Zasady weryfikacji rozmytej i zastosowaną notację omówiono na podstawie pracy [Ebert 2002]. Jak wspomniano, w metodach rozmytych napotykamy dwa podejścia do porównywania danych obserwacyjnych i prognostycznych – można je określić odpowiednio jako: strategię *pojedyncza obserwacja-prognoza w sąsiedztwie (SO-NF)* i strategię *obserwacja w sąsiedztwie-prognoza w sąsiedztwie (NO-NF)*. Termin *pojedyncza obserwacja* dotyczy danych z jednej stacji meteorologicznej, a termin *sąsiedztwo* dotyczy grupy sąsiadujących węzłów siatki modelu numerycznego lub grupy sąsiadujących stacji w przypadkach obserwacji. W pracy przyjęto następujące oznaczenia:

$X$  – wartość obserwowana,

$Y$  – wartość prognozowana,

$\langle \rangle_s$  – wartość parametru fizycznego w otoczeniu rozpatrywanego położenia (gdzie  $s$  określa skalę, czyli wielkość, analizowanego otoczenia),

$\bar{X}$  i  $\bar{Y}$  – wartość średnia odpowiednio obserwowana i prognozowana obliczana w zależności od przyjętego sposobu liczenia średniej w danej metodzie (np. średnia arytmetyczna, geometryczna, ważona).

Wprowadzamy dwa wskaźniki:

$I_x$  przyjmujący wartość 1, gdy w danej stacji synoptycznej zaobserwowano zjawisko, a wartość 0, gdy nie zaobserwowano zjawiska;

$I_y$  przyjmujący wartość 1, gdy w danym węźle siatki model zaprognozował zjawisko, a wartość 0, gdy w tym węźle siatki zjawisko nie było prognozowane.

Zjawiskiem nazywamy wystąpienie wartości rozpatrywanego pola powyżej zadanej wartości progowej.

Oznaczenia  $\langle I_x \rangle_s$  oraz  $\langle I_y \rangle_s$  odpowiadają dwu korespondującym przestrzeniom: obserwacji i prognoz w otoczeniu wybranej lokalizacji. W przypadku podejścia probabilistycznego stosujemy mierniki i wskaźniki probabilistyczne:

$$\langle P_x \rangle_s = \frac{1}{N} \sum_N I_x, \quad \langle P_y \rangle_s = \frac{1}{N} \sum_N I_y$$

gdzie:  $N$  – liczba węzłów siatki uwzględnionych w sąsiedztwie,  $\langle P_x \rangle_s$  – częstość wystąpienia zjawiska obserwowanego w sąsiedztwie o skali  $s$  danej lokalizacji,  $\langle P_y \rangle_s$  – częstość wystąpienia zjawiska prognozowanego w sąsiedztwie o skali  $s$  wokół danej lokalizacji.

Tab 1 Metody weryfikacji rozmytej

Metoda rozmyta	Strategia porównania	Model decyzyjny	Porównywane wielkości	Formuła decyzyjna dla zdarzenia I
Uśrednianie w dużej skali ( <i>upsampling</i> )	NO-NF	Dobra prognoza przypomina uśrednione do większej skali obserwacje	$\langle I_x \rangle_s, \langle I_y \rangle_s$	$\langle I_y \rangle_s = \begin{cases} 0, & \text{gdy } \langle \bar{Y} \rangle_s < \text{próg} \\ 1, & \text{gdy } \langle \bar{Y} \rangle_s \geq \text{próg} \end{cases}$ $\langle I_x \rangle_s = \begin{cases} 0, & \text{gdy } \langle \bar{X} \rangle_s < \text{próg} \\ 1, & \text{gdy } \langle \bar{X} \rangle_s \geq \text{próg} \end{cases}$
Najmniejszego obszaru ( <i>minimum coverage</i> )	NO-NF	Dobra prognoza przewiduje zdarzenie na minimalnym ułamku obszaru zainteresowania	$\langle I_x \rangle_s, \langle I_y \rangle_s$	$\langle I_y \rangle_s = \begin{cases} 0, & \text{gdy } \langle P_y \rangle_s < P_e \\ 1, & \text{gdy } \langle P_y \rangle_s \geq P_e \end{cases}$ $\langle I_x \rangle_s = \begin{cases} 0, & \text{gdy } \langle P_x \rangle_s < P_e \\ 1, & \text{gdy } \langle P_x \rangle_s \geq P_e \end{cases}$
Logika rozmyta ( <i>fuzzy logic</i> ), łączone prawdopodobieństwo ( <i>joint probability</i> )	NO-NF	Dobra prognoza jest bardziej trafna niż nietrafna	$\langle I_x \rangle_s, \langle I_y \rangle_s$	$\langle I_y \rangle_s = \langle P_y \rangle_s$ $\langle I_x \rangle_s = \langle P_x \rangle_s$
Wielozdarzeniowa tablica wielozdzielcza ( <i>multi-event contingency table</i> )	SO-NF	Dobra prognoza przewiduje przynajmniej jedno zdarzenie blisko zdarzenia obserwowanego	$I_x, \langle I_y \rangle_s$	$\langle I_y \rangle_s = \begin{cases} 0, & \text{gdy } \langle P_y \rangle_s < P_e \\ 1, & \text{gdy } \langle P_y \rangle_s \geq P_e \end{cases}$
Pragmatyczna ( <i>pragmatic</i> )	SO-NF	Dobra prognoza przewiduje wystąpienie jak i niewystąpienie zjawiska z dużym prawdopodobieństwem	$I_x, \langle P_y \rangle_s$	$\langle P_y \rangle_s = \frac{1}{N} \sum_N I_y$
Częstościowa ( <i>fraction skill score</i> )	NO-NF	W dobrej prognozie częstość przewidywana wystąpienia zdarzenia jest podobna częstości zdarzeń obserwowanych	$\langle P_x \rangle_s, \langle P_y \rangle_s$	$\langle P_x \rangle_s = \frac{1}{N} \sum_N I_x$ $\langle P_y \rangle_s = \frac{1}{N} \sum_N I_y$

Do najprostszych metod weryfikacji rozmytej należy uśrednianie (wyznaczanie wartości średniej dla zadanego obszaru) prognozy i obserwacji do większej skali (*upsampling*) (np. [Yates i in. 2006]), a następnie porównanie otrzymanych wartości z wykorzystaniem tradycyjnych wskaźników. W metodzie minimum powierzchni (*minimum coverage*) założono [Damrath 2004], że zarówno obserwowane, jak i prognozowane zjawiska znajdują się „gdzieś” w zadanym otoczeniu rozważanego położenia. W metodzie określamy ułamek powierzchni otoczenia, nad którym wartość weryfikowanego pola przekracza wartość progową i uznajemy, że

zjawisko występuje, jeśli ten ułamek powierzchni jest nie mniejszy niż założony minimalny ułamek powierzchni otoczenia  $\langle P_e \rangle$  zarówno w przypadku obserwacji, jak i prognozy. Kolejna metoda, rozwijana przez Damratha [2004] i modyfikowana przez Ebert [2002], wykorzystuje tablice kontyngencyjne (tab. 2), których elementy określone są za pomocą prawdopodobieństwa wystąpienia lub niewystąpienia zjawiska prognozowanego i częstości wystąpienia lub niewystąpienia zjawiska obserwowanego. Wskaźniki  $\langle I_x \rangle_s$  oraz  $\langle I_y \rangle_s$  są zdefiniowane jako prawdopodobieństwa  $\langle P_x \rangle_s$  i  $\langle P_y \rangle_s$  i przyjmują wartości z przedziału od 0 do 1. Do określenia zgodności prognozy i obserwacji Atger [2001] zaproponował wielozdarzeniową tablicę kontyngencyjną (*multi-event contingency table*), która pozwala rozszerzyć tablicę kontyngencyjną o kolejne wymiary odpowiadające wielu wartościom progowym zjawiska (np. opadu). Podobnie jak u Damratha [2004] w metodzie tej zostało zastosowane kryterium minimalnej powierzchni. Kolejną metodę pozwalającą wprost porównać stopień powierzchni analizowanego otoczenia objętego występowaniem zjawiska obserwowanego i prognozowanego za pomocą wskaźnika *Fractions Skill Score* (FSS) (tab. 3) zaprezentowali Roberts i Lean [2008]. Informację o występowaniu zjawisk w otoczeniu oparto na wartości *FBS* (ibidem), a nie na częstościach. Podejście pragmatyczne w weryfikacji prognozy pogody zasugerowali Theis i in. [2005]. Zaproponowali oni weryfikowanie prawdopodobieństwa w otoczeniu z wartością obserwowaną w środkowym węźle analizowanego obszaru. Zestawienie metod weryfikacji rozmytej zostało przytoczone za Ebert (2008) w tab. 1.

Tab. 2. Tabela kontyngencyjna (wielodzzielcza)

		Obserwowane zjawisko		
		tak	nie	
Prognozowane zjawisko	tak	trafione wystąpienie $C_H$ (hits)	falszywy alarm $C_F$ (false alarms)	Prognozowane tak
	nie	nietrafiony brak $C_M$ (misses)	trafiony brak $C_C$ (correct rejections)	Prognozowane nie
		Obserwowane tak	Obserwowane nie	n

Dla zjawisk binarnych (przyjmujących wartości „tak” albo „nie”) wystąpieniem zjawiska (“tak”) nazywamy fakt wystąpienia wartości weryfikowanego pola większej lub równej określonej wartości progowej. W przeciwnym przypadku mówimy, że zjawisko nie było obserwowane (“nie”) (WWRP 2009-1). W weryfikacji rozmytej o wystąpieniu albo niewystąpieniu zjawiska decyduje model decyzyjny i strategia porównawcza przyjętej metody. Rozkład obserwowanych i prognozowanych wystąpień lub niewystąpień zjawiska w objętym weryfikacją okresie przedstawiany jest w tzw. tabeli kontyngencyjnej (tab. 2).

Na podstawie elementów tej tabeli zdefiniowanych zostało wiele wskaźników pozwalających ocenić jakość prognozy.

Gdy weryfikowane są prognozy probabilistyczne (prognoza wystąpienia zjawiska podana jest jako prawdopodobieństwo wystąpienia zjawiska), a obserwowana

nemu zjawisku przypisujemy wartość 1 w przypadku obserwacji, 0 w przypadku gdy zjawisko nie było obserwowane lub wartość częstości wystąpienia w zadanym otoczeniu, podstawowymi wskaźnikami w przestrzeni probabilistycznej są wskaźniki Briera BS, FBS, FSS oraz ROC. Wskaźnik Briera (BS) mierzy błąd średni kwadratowy w przestrzeni probabilistycznej. Poniżej zestawione zostały (tab. 3) i krótko omówione wskaźniki zastosowane w stworzonym w Oddziale Krakowskim IMGW-PIB systemie weryfikacji opartym na metodach weryfikacji rozmytej.

Tab. 3 Wskaźniki stosowane w weryfikacji (w kolejności alfabetycznej)

Akronim	Nazwa	Definicja
BS albo FBS	wskaźnik Briera (Brier Score) albo częściowy wskaźnik Briera (Fractions Brier Score)	$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2$ <p>gdzie <math>p_i</math> prawdopodobieństwo prognozowanego zdarzenia, <math>o_i</math> wystąpienie (wartość 1) albo niewystąpienie (wartość 0) albo częstość wystąpienia obserwacji w zależności od metody:</p> <p>w podejściu pragmatycznym <math>BS = \frac{1}{N} \sum_N \left( \langle P_y \rangle_s - I_s \right)^2</math></p> <p>w metodzie FSS <math>BS = \frac{1}{N} \sum_N \left( \langle P_y \rangle_s - \langle P_x \rangle_s \right)^2</math></p>
CSI (=TS)	krytyczny wskaźnik sukcesu (Critical Success Index)	$CSI = \frac{C_H}{C_H + C_M + C_F}$
ETS	jak TS, ale z uwzględnieniem jedynie trafienia przypadkowego (Equitable Threat Score)	$ETS = \frac{C_H - C_{Hrandom}}{C_H + C_M + C_F - C_{Hrandom}}$ <p>gdzie <math>C_{Hrandom} = (C_H + C_M)(C_H + C_F)/N</math></p>
F lub FA	wskaźnik fałszywego alarmu (False Alarm Ratio)	$F = \frac{C_F}{C_C + C_F}$
FAR (=PAG)	wskaźnik fałszywego alarmu (False Alarm Ratio)	$FAR = \frac{C_F}{C_H + C_F}$
FSS	wskaźnik (Fractions Skill Score)	$FSS = 1 - \frac{FBS}{\frac{1}{N} \left[ \sum_N \langle P_y \rangle_s^2 + \sum_N \langle P_x \rangle_s^2 \right]}$
H lub HR (= POD)	wskaźnik trafień (Hit Rate)	$H = \frac{C_H}{C_H + C_M}$
PAG (=FAR)	wskaźnik fałszywego alarmu (Post Agreement)	$PAG = \frac{C_F}{C_H + C_F}$
PC	wskaźnik trafności zdarzenia (Proportion Correct Hit Rate)	$PC = \frac{C_H + C_C}{n}$
POD (=H)	Prawdopodobieństwo detekcji (Probability of Detection, Prefiguration)	$POD = \frac{C_H}{C_H + C_M}$
ROC	krzywa ROC (Relative Operating Characteristic)	Krzywa (zależność) H(F) (jako próg prawdopodobieństwa rosnący od 0 do 1)
TS (=CSI)	krytyczny wskaźnik sukcesu (Threat Score)	$TS = \frac{C_H}{C_H + C_M + C_F}$



Wskaźniki oparte na zliczeniach w tabeli kontyngencyjnej:

- POD – miara obserwowanych zjawisk, które były prawidłowo prognozowane; im większa wartość, tym lepsza zgodność prognozy i obserwacji;
- PC – miara wszystkich prawidłowych prognoz; im większa wartość, tym lepsza zgodność prognozy i obserwacji. Jego wartość maleje ze zwiększającą się skalą i rośnie z wysokością wartości progowej;
- F – miara prognozowanych zjawisk, które nie były obserwowane (względem wszystkich zjawisk, które nie były obserwowane); im mniejsza wartość, tym lepsza zgodność prognozy i obserwacji;
- FAR – miara prognozowanych zjawisk, które nie były obserwowane (względem wszystkich zjawisk prognozowanych), im mniejsza wartość, tym lepsza zgodność prognozy i obserwacji;
- TS – miara prawidłowo prognozowanych zjawisk względem wszystkich, które były obserwowane i prognozowane; im większa wartość, tym lepsza zgodność prognozy i obserwacji;
- ETS – jak TS, ale z uwzględnieniem prawidłowo prognozowanych zjawisk będących wynikiem jedynie przypadku; im większa wartość, tym lepsza zgodność prognozy i obserwacji.

Wskaźniki probabilistyczne:

- BS, FBS – błąd średni kwadratowy prognozy względem obserwacji w przestrzeni probabilistycznej; im mniejsza wartość, tym lepsza zgodność prognozy i obserwacji;
- FSS – wskaźnik oparty na wartości FBS z uwzględnieniem najgorszej z możliwych prognoz, przyjmuje wartości z przedziału  $[0, 1]$ , przy czym 1 oznacza idealną zgodność prognozy i obserwacji;
- ROC – krzywa pokazująca zależność H od F w przestrzeni probabilistycznej; im większe pole pod krzywą tym prognoza lepsza.

### **3. Architektura systemu weryfikacji rozmytej**

Przygotowany w ramach realizacji zadania 5.3 system weryfikacji rozmytej jest zorientowany na weryfikację mezoskalowych prognoz opadu. Poszczególne komponenty systemu umożliwiają pobieranie niezbędnych danych z baz danych prognostycznych modeli ALADIN i AROME oraz z baz danych obserwacyjnych Systemu Hydrologii, wyznaczenie szeregu wskaźników jakości prognozy zgodnie z zaimplementowanymi metodami weryfikacji oraz wizualizację wyników weryfikacji i prezentację produktów wizualizacji na stronach www dostępnych w Intranecie IMGW-PIB. Stworzony system to zespół zintegrowanych skryptów napisanych w języku powłoki Bourne'a, języku Python oraz w języku programowania R, działających w środowisku OS Linux.

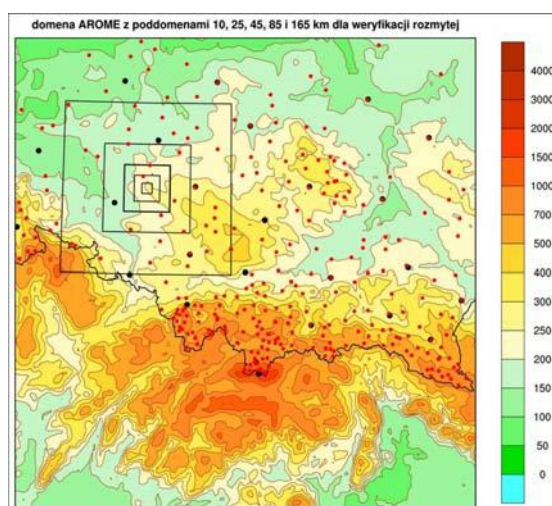
W pierwszej fazie działania systemu zostają pobrane z dostępnych baz danych i wstępnie przetworzone niezbędne dane wejściowe. W cyklu godzinnym są pozyskiwane dane ze stacji synoptycznych oraz automatycznych stacji sieci ATS. Na ich podstawie są tworzone korespondujące ze sobą obserwowane i prognozowane 12-

i 24-godzinne sumy opadu. Następnie lokalizacjom, dla których jest prowadzona weryfikacja rozmyta, przyporządkowuje się węzły siatki modelu i punkty pomiarowe zgodnie z przyjętą skalą  $s$ . Kolejny etap to obliczanie wskaźników dla konkretnych metod weryfikacji zgodnie z ich modelem decyzyjnym. Wyznaczane są elementy tablicy kontyngencyjnej (tab. 2) dla wybranych otoczeń (skal) danej stacji obserwacyjnej, a na podstawie tych elementów – wskaźniki celności prognozy (tab. 3). Dla metod *multi events*, *fuzzy logic*, *upscaling* i *minimum coverage* obliczane są wskaźniki POD, PC, F, FAR, ETS, TS i krzywa ROC, dla metody *pragmatic approach* wskaźnik BS, a dla metody *fractions skill score* wskaźniki FSS i FBS. Otrzymane w formacie ASCII wyniki są wizualizowane w postaci tabel i wykresów z wykorzystaniem pakietu gnuplot oraz biblioteki plotrix pakietu R. Prezentowane są one następnie na stronach www w intranecie IMGW-PIB.

#### 4. Testy działania systemu weryfikacji rozmytej

Stworzony system weryfikacji mezoskalowej testowano wykorzystując prognozy mezoskalowe modelu ALADIN o rozdzielczości przestrzennej ok. 13,5 km, rozdzielczości czasowej 3 godz. i horyzoncie czasowym 54 godziny. Prognozy te są oparte na danych z godziny 00 lub 12 UTC. Weryfikacji podlegały również prognozy modelu wysokiej rozdzielczości AROME o rozdzielczości przestrzennej ok. 2,7 km, rozdzielczości czasowej 1 godz. i horyzoncie czasowym 30 godzin, oparte na danych z godziny 00 UTC. Domena ALADIN obejmuje obszar całej Polski, natomiast domenę AROME stanowi silnie zróżnicowany orograficznie obszar południowej Polski (rys. 1).

Prognozy były weryfikowane względem danych obserwacyjnych ze stacji meteorologicznych SYNOP oraz z automatycznych stacji pomiarowych (ATS). Baza danych SYNOP obejmuje dane z 60 stacji (z całego obszaru Polski). Dane ATS pochodzą z 446 stacji pokrywających obszar Polski i cechują się rozdzielczością czasową 10 min.



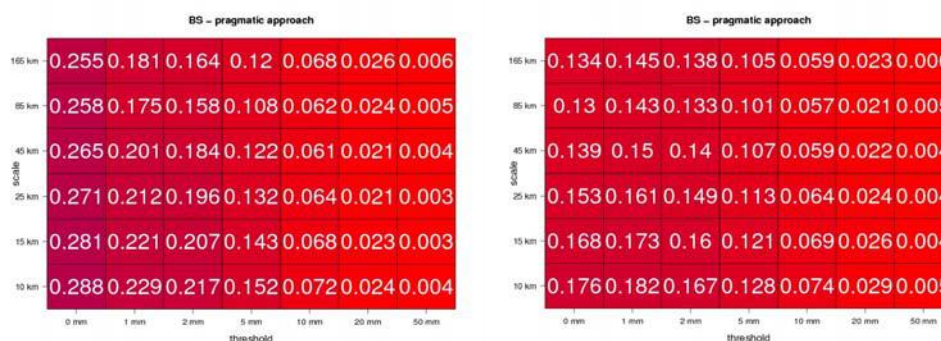
Rys. 1. Obszar badań z naniesionymi przykładowymi otoczeniami stacji synoptycznych (kwadraty odpowiadające skalom: 10, 25, 45, 85 i 165 km) i stacjami synoptycznymi (czarne punkty)

Zgodnie z zaleceniami WMO [WWRP 2009 – 1] do weryfikacji prognoz względem danych ze stacji synoptycznych zastosowano metody o strategii *SO-NF*, a w przypadku gęstej siatki obserwacyjnej ATS – metody o strategii *NO-NF*.

Do testów wykorzystano dane z okresu grudzień 2009 – listopad 2010. Weryfikacji podlegały 24-godzinne kumulacje opadu, a po konsultacji z synoptykiem przyjęto następujące wartości progowe kumulacji: 0, 1, 2, 5, 10, 20, 50 mm, gdzie 0 mm oznacza niewystąpienie opadu.

Dzięki przeprowadzonej analizie można było opisać sezonową zależność jakości prognoz opierając się na wyznaczonych wskaźnikach będących miarami prawidłowych prognoz (PC, POD, TS, ETS) albo fałszywych alarmów (F, FAR), a także porównać trafność prognoz mezoskalowych ALADIN i wysokiej rozdzielczości AROME. Wskaźniki te wybrano spośród sugerowanych przez WMO [WWRP 2009 – 1] w taki sposób, aby pokazać jak najszersze spektrum sprawdzalności prognoz, tj. najbardziej interesującą trafność prognozy opadu POD, TS i ETS, trafność prognozy opadu i niewystąpienia opadu PC, błąd średni kwadratowy prognozy względem obserwacji BS, oraz istotne m.in. ze względów ekonomicznych i bezpieczeństwa wskaźniki fałszywego alarmu F i FAR, pokazujące jak często prognozowany jest nieobserwowany później opad. Wymienione wskaźniki zdefiniowano i opisano w p. 2 – *Wybrane metody i wskaźniki...* (tab. 3).

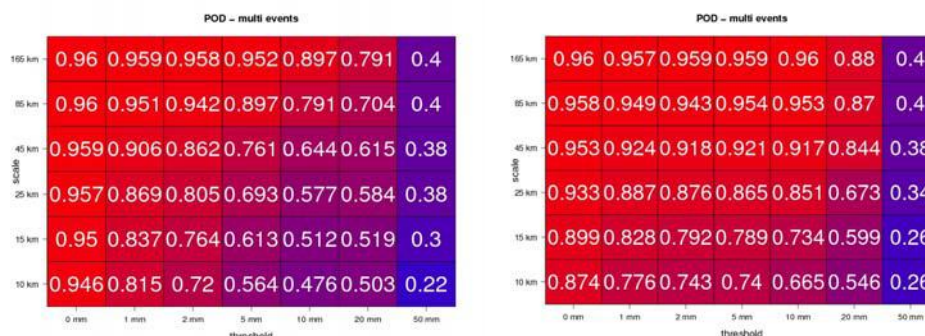
Wybrane wyniki tych testów są przedstawione w postaci tabel wskaźników BS (rys. 2) i POD (rys. 3) na przykładzie weryfikacji modeli ALADIN i AROME względem danych obserwacyjnych pochodzących z automatycznych stacji synoptycznych ATS, z obszaru domeny modelu AROME metodami *multi events i pragmatic approach* dla wiosny (miesiące marzec – maj) 2010. Dla lepszego zobrazowania celności prognoz zastosowano skalę barwną (czerwono-niebieską) wypełniającą obszary dla danego proggu i danej skali, przy czym barwa czerwona oznacza dobrą sprawdzalność, a niebieska – sprawdzalność słabą.



Rys. 2. Wskaźnik BS w metodzie *pragmatic approach*. Weryfikacja modelu ALADIN (z lewej) i AROME (z prawej) względem danych obserwacyjnych

Na rys. 2 pokazane są wyniki weryfikacji rozmytej dla modelu ALADIN i AROME. Widać, że lepsze rezultaty (mniejsze wartości wskaźnika BS) uzyskuje w prezentowanym przypadku model AROME. Niemal dla wszystkich progów i skal przestrzennych wartości wskaźnika BS są mniejsze niż w modelu ALADIN.

Jedynie dla najwyższych opadów, powyżej progu 20 mm wyniki są porównywalne dla obu modeli a im opady mniejsze tym różnica jest coraz większa na korzyść modelu AROME.



Rys. 3. Wskaźnik POD w metodzie *multi events*. Weryfikacja modelu ALADIN (z lewej) i AROME (z prawej) względem danych obserwacyjnych

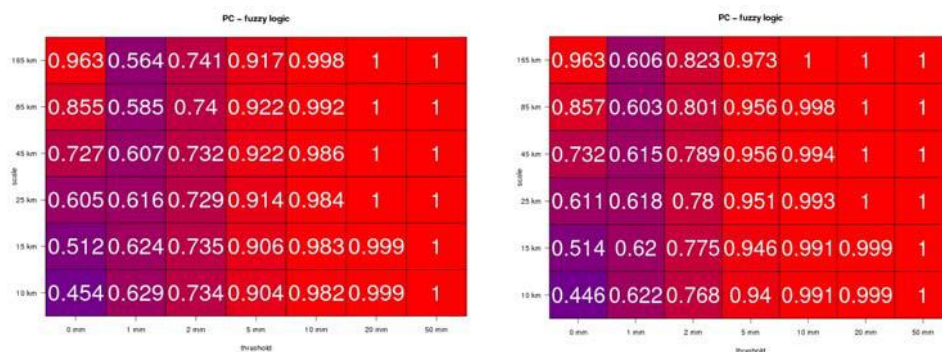
Wartości wskaźnika POD (rys. 3) pokazują, że prognozy modelu ALADIN i modelu AROME są porównywalne jedynie w największej skali przestrzennej – 165 km. Lepszą zgodność modelu AROME z obserwacjami widać szczególnie dla małych skal i dużych opadów (ale mniejszych od 50 mm, co może być konsekwencją małej liczby przypadków dla największych opadów). Z kolei dla małych skal i małych opadów weryfikacja prognoz modelu ALADIN pokazuje lepszą zgodność z obserwacjami niż prognozy modelu AROME.

W tym miejscu należy zwrócić uwagę na ważną różnicę między weryfikacją tradycyjną a rozmytą. Z powodu mnogości metod i wskaźników w weryfikacji rozmytej mamy możliwość interpretowania wielu aspektów prognozy. Analizując rys. 2 i 3, można dojść do wniosku, że uzyskane w nich wyniki są ze sobą sprzeczne. Wskaźnik BS uzyskuje najlepsze wyniki dla dużych opadów, a wskaźnik POD dla małych. Wynika to właśnie ze wspomnianej wcześniej różnicy w wyznaczaniu tych dwóch wskaźników. BS to błąd średni kwadratowy prognozy względem obserwacji w metodzie *pragmatic approach*, natomiast POD to miara obserwowanych zjawisk, które były prawidłowo prognozowane w metodzie *multi events*. Przedstawione wyniki, choć różne, nie są ze sobą sprzeczne, a przedstawiają jedynie różne właściwości weryfikowanych prognoz.

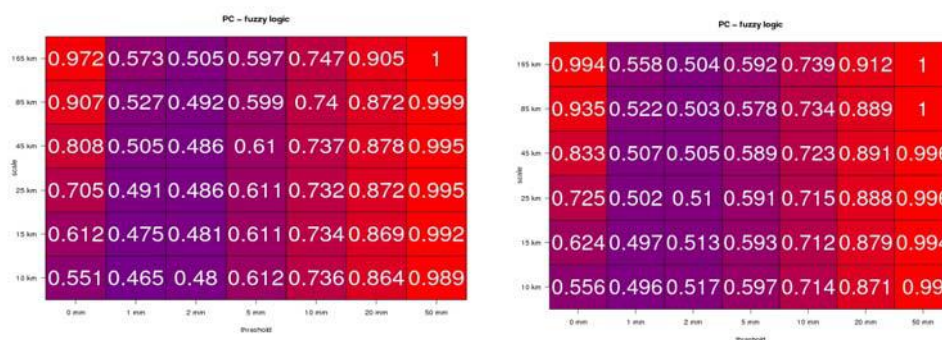
Na uwagę zasługują rezultaty dotyczące sezonowej zmienności celności prognoz modeli ALADIN i AROME. Porównanie wskaźników FAR i PC dla metod *fuzzy logic*, *upscaling* i *minimum coverage* pokazuje wyraźną różnicę dla miesięcy zimowych i letnich w badanym okresie. W miesiącach od stycznia do marca i od października do grudnia lepsze wyniki weryfikacji rozmytej uzyskuje model AROME (przykład na rys. 4), natomiast w miesiącach od kwietnia do września wyniki obu modeli są bardziej zbliżone do siebie (przykład na rys. 5). Zależność ta została przedstawiona na rys. 4 i 5, gdzie prezentowane są wyniki weryfikacji modeli ALADIN i AROME względem danych z automatycznych stacji synoptycz-



nych ATS z obszaru domeny modelu AROME. Wskaźnik PC dla stycznia 2010 przedstawiono na rys. 4, natomiast dla sierpnia 2010 – na rys. 5.



Rys. 4 Wskaźnik PC w metodzie *fuzzy logic* dla stycznia 2010 roku. Weryfikacja modelu ALADIN (z lewej) i AROME (z prawej) względem danych obserwacyjnych



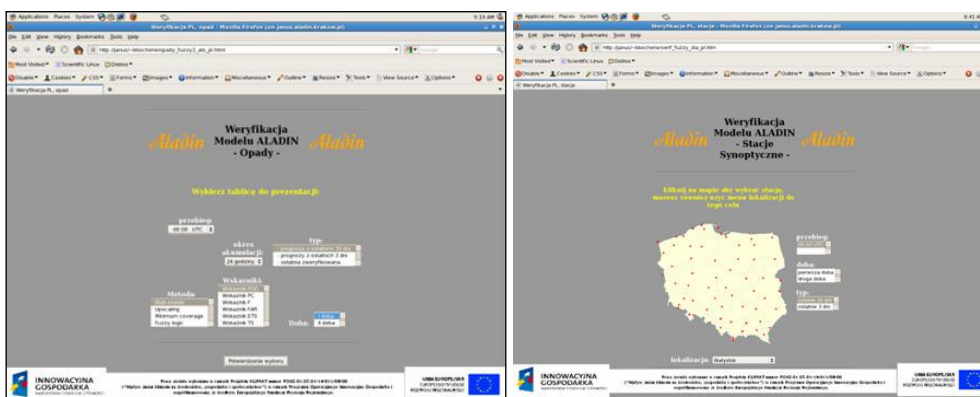
Rys. 5 Wskaźnik PC w metodzie *fuzzy logic* dla sierpnia 2010 roku. Weryfikacja modelu ALADIN (z lewej) i AROME (z prawej) względem danych obserwacyjnych

## 5. Quasi-operacyjna eksploatacja systemu weryfikacji rozmytej

System weryfikacji rozmytej ma służyć celom badawczo-wdrożeniowym i operacyjnym. Z myślą o tym drugim przeznaczeniu przygotowano zmodyfikowaną wersję systemu i wykonano wielotygodniowy test jego pracy w warunkach symulujących eksploatację operacyjną. Test ruszył w listopadzie 2011 roku na serwerze operacyjnym w DNPM ALADIN. W pierwszym etapie weryfikacji wykorzystywano dane ze stacji synoptycznych, w drugim także dane ze stacji sieci ATS. Analiza rutynowej pracy oprogramowania doprowadziła do szeregu modyfikacji.

System jest uruchamiany automatycznie. W wersji quasi-operacyjnej weryfikacja obejmuje 24-godzinne kumulacje opadów. Codziennie przygotowywanych jest około 3000 tabel i wykresów z wynikami weryfikacji. Tabele te i wykresy dostępne są w Intranecie IMGW-PIB. Dostęp do wyników weryfikacji odbywa się za pomocą trzech grup stron www: weryfikacja modelu ALADIN dla sumarycznych danych ze wszystkich stacji synoptycznych, weryfikacja modelu ALADIN

dla każdej stacji synoptycznej z osobna (rys. 6) i weryfikacja modelu ALADIN z uwzględnieniem sumarycznych danych obserwacyjnych ze wszystkich automatycznych stacji synoptycznych (rys. 6).



Rys. 6. Przykładowa strona intranetowa. Weryfikacja modelu ALADIN względem danych z automatycznych stacji synoptycznych (z lewej) i względem danych ze stacji synoptycznych wersja dla każdej stacji z osobna (z prawej)

Na stronach intranetowych istnieje możliwość wyboru wskaźnika dla danej metody (POD, PC, F, FAR, TS, ETS, BS, krzywa ROC), pierwszej lub drugiej doby prognozy (kumulacja 0-24 lub 24-48 poprzez wybór 24 lub 48 godziny prognozy odpowiednio), typu weryfikacji (ostatni dzień prognozy, ostatnie 3 dni i ostatni miesiąc) i godziny prognozy (00:00 lub 12:00). Dodatkowo, na stronie prezentującej wyniki weryfikacji rozmytej dla każdej stacji z osobna, istnieje możliwość wyboru na mapie Polski konkretnej stacji synoptycznej. Obecnie wyniki systemu weryfikacji rozmytej pracującego w trybie quasi-operacyjnym dostępne są codziennie o godzinie 7:30 UTC.

## Literatura

- Atger F., 2001. Verification of precipitation forecasts from single models and ensemble prediction systems. *Nonlin. Proc. Geophys.*, 401-417
- Biblioteka plotrix do pakietu R [<http://cran.r-project.org/web/packages/plotrix/plotrix.pdf>]
- Brooks H.E., Kay M, Hart J. A., 1998. Objective limits on forecasting skill of rare events, 19<sup>th</sup> Conferences Severe Local Storms. AMS: Minneapolis, MN; 552-555
- Casati B., Ross D., Stephenson B., 2004. A new intensity-scale approach for the verification of spatial precipitation forecasts. *Meteorol. Appl.*, 11, 141-154
- Damrath U., 2004, Verification against precipitations observations of a high density network – what did we learn? [In:] Verification Methods Workshop, 15–17 September 2004, Montreal, Canada. [online at [http://www.bom.gov.au/bmrc/wefor/staff/eee/verif/Workshop2004/presentations/5.3\\_Damrath.pdf](http://www.bom.gov.au/bmrc/wefor/staff/eee/verif/Workshop2004/presentations/5.3_Damrath.pdf); 24 November 2006]
- Ebert E.E., 2002. Fuzzy verification: giving partial credit to erroneous forecasts. In NCAR/FAA Verification Workshop: Making Verification More Meaningful, NCAR, Boulder, 30 July–1 August 2002 [online at [http://www.rap.ucar.edu/research/verification\\_wkshp\\_2002/program.html](http://www.rap.ucar.edu/research/verification_wkshp_2002/program.html)]

- Ebert E.E., 2008. Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: a review and proposed framework. *Meteorol. Appl.*, 15, 51-64
- Germann U., Zawadzki I., 2004. Scale dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part II: Probability forecasts. *J. Appl. Meteorol.*, 43, 74-89
- Rezacova D., Sokol Z., Pesice P., 2007. A radar-based verification of precipitation forecast for local convective storms. *Atmos. Res.*, 83, 211-224
- Roberts N.M, Lean H.W., 2005. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events, *Mon. Weath. Rev.* 136, 78-97
- Theis S.E., Hense A, Damrath U., 2005. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: a pragmatic approach. *Meteorol. Appl.*, 12, 257-268
- Wilson L.J., 2001. Verification of precipitation forecasts: A survey of methodology Part I: General framework and verification of continuous variables. WWRP/WMO workshop on the verification of quantitative precipitation forecasts, May 14–16 Prague 2001  
[[http://www.chmi.cz/meteo/ov/wmo/src/wilson\\_paper\\_prague.pdf](http://www.chmi.cz/meteo/ov/wmo/src/wilson_paper_prague.pdf)]
- WWRP 2009 – 1, Recommendations for the Verification and Intercomparison of QPFs and PQPFs from Operational NWP Models
- Yates E. i in., 2006, Point and areal validation of forecast precipitation fields. *Meteorol. Appl.*, 13, 1-20



z

## **CZEŚĆ II.**

# **NOWOCZESNE METODY MONITORINGU I PROGNOZOWANIA STANU ŚRODOWISKA ATMOSFERYCZNEGO**



## Problemy zanieczyszczeń powietrza

*Krzysztof Klejnowski, Wioletta Rogula-Kozłowska,  
Barbara Błaszczak, Leszek Ośródk, Ewa Krajny*

Ochrona powietrza przed zanieczyszczeniem ma ogromne znaczenie dla stanu zdrowia społeczeństwa, a także stanu środowiska przyrodniczego. Do roku 1988 zanieczyszczenie powietrza w Polsce należało do najwyższych w Europie [PE 2008]. Ukształtowany w 2. połowie XX wieku silny przemysł wydobywczy, metalurgiczny, stoczniowy, maszynowy i chemiczny oraz dominujący charakter wydobywczo-surowcowy całej gospodarki przyczyniły się do degradacji środowiska i wpłynęły na wyraźne pogorszenie warunków życia ludzi [Koniecznyński 2004]. Szacuje się, że w latach 80. straty materialne, jakie Polska ponosiła w wyniku zanieczyszczenia powietrza, wyniosły około 5% dochodu narodowego [PE 2008].

Daleko idące zmiany społeczno-gospodarcze po 1989 r. miały niewątpliwy wpływ na jakość powietrza w Polsce. Już w pierwszych latach transformacji ustanowiono nowe, bardziej restrykcyjne prawo. W 1991 r. weszła w życie ustawa z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska [Ustawa ... 1991] i wydano pierwszą *Politykę ekologiczną Państwa*, jako dokument strategiczny dla rozwoju kraju [PE 2008]. Utworzenie „listy 80” najbardziej uciążliwych dla środowiska zakładów<sup>1</sup> oraz podjęcie działań w stosunku do zakładów na niej umieszczonych stanowiło realizację jednego z istotnych elementów tej polityki, jakim była możliwie szybka likwidacja ekstremalnych zagrożeń środowiska [Koniecznyński 2004].

Pod koniec lat 90. tempo poprawy jakości środowiska w Polsce znacznie się zmniejszyło. Wykorzystano w dużej mierze proste rezerwy, zmalały nakłady na ochronę środowiska, a decyzja parlamentu o zespoleniu wojewódzkich inspektoratów ochrony środowiska z administracją wojewódzką uzależniła je od władz regionalnych.

Nowym istotnym impulsem w dziedzinie ochrony środowiska okazała się bliska perspektywa przystąpienia Polski do Unii Europejskiej. Przepisy Traktatu Ak-

---

<sup>1</sup> „Lista 80” została ogłoszona przez Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa w styczniu 1990 r. (obwieszczenie MOŚZNiL w dzienniku „Rzeczpospolita” Nr 12 z 15 stycznia 1990 r.). Z dniem 16 października 2005, na wniosek Głównego Inspektora Ochrony Środowiska, Minister Środowiska podjął decyzję o zakończeniu funkcjonowania „Listy 80” i szczególnego nadzoru Głównego Inspektora nad zakładami umieszczonymi na liście.

cesyjnego stawiały RP poważne zadania do wypełnienia. Poza tym Polska zobowiązała się do przestrzegania wielu unijnych dyrektyw w zakresie ochrony powietrza i klimatu, w tym na podkreślenie zasługują [PE 2008]:

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2001/81/WE z dnia 23 października 2001 r. w sprawie krajowych poziomów emisji dla niektórych rodzajów zanieczyszczenia powietrza (tzw. dyrektywa NEC);
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2001/80/WE z dnia 23 października 2001 r. w sprawie ograniczenia emisji niektórych zanieczyszczeń do powietrza z dużych obiektów energetycznego spalania (tzw. dyrektywa LCP);
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/1/WE z dnia 15 stycznia 2008 r. dotycząca zintegrowanego zapobiegania zanieczyszczeniom i ich kontroli (zmieniająca Dyrektywę 96/61/WE; tzw. dyrektywa IPPC);
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy (tzw. dyrektywa CAFE);
- Rozporządzenie (WE) nr 842/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie niektórych fluorowanych gazów cieplarnianych (tzw. F-gazy).

Pomimo opóźnień i zaniedbań uwarunkowanych dziedzictwem przeszłości restrukturyzacja gospodarki postępuje, a wraz z nią wprowadzenie sprawnych metod ograniczania emisji zanieczyszczeń. W Polsce w ostatnich dwóch dekadach obserwowano systematyczny spadek emisji wszystkich podstawowych zanieczyszczeń powietrza [GIOŚ 2010], szczególnie wyraźnie spadała emisja dwutlenku siarki i tlenków azotu (tab. 1) [GUS 2010, 2009, 2008, 2006, 2005]. Spadek ten był w dużej mierze związany z restrukturyzacją lub modernizacją sektora energetycznego oraz poprawą jakości węgla [GIOŚ 2010]. Charakterystycznym zjawiskiem jest również spadek emisji zanieczyszczeń z zakładów przemysłowych (tab. 2) [GUS 2010, 2009, 2006]. Na początku lat 90. przemysł w Polsce stanął przed koniecznością restrukturyzacji organizacyjnej i technicznej. Wprowadzono wiele

Tab. 1. Całkowita emisja głównych zanieczyszczeń powietrza w Polsce

Rok	Emisja (Gg)						
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> <sup>a</sup>	CO <sub>2</sub>	CO	NM VOC <sup>b</sup>	NH <sub>3</sub>	Pyły
1990	3210	1280	368409	-	1121 (831/290) <sup>c</sup>	550	1950
1995	2376	1120	365910	4547	1076 (769/307) <sup>c</sup>	380	1308
2000	1511	838	320727	3463	904 (399/306) <sup>c</sup>	322	464
2001	1564	805	317844	3528	873 (576/297) <sup>c</sup>	328	491
2002	1456	796	308277	3410	898 (600/298) <sup>c</sup>	325	473
2003	1375	808	319082	3318	892 (585/307) <sup>c</sup>	323	476
2004	1241	804	316700	3426	896 (597/299) <sup>c</sup>	317	443
2005	1222	811	319286	3333	885 (585/301) <sup>c</sup>	326	430
2006	122	921	329599	2804	929 (628/302) <sup>c</sup>	287	458
2007	1216	860	328511	2553	879 (568/311) <sup>c</sup>	289	430
2008	999	831	325381	2674	894 (583/312) <sup>c</sup>	285	421

<sup>a</sup> wyrażone jako NO<sub>2</sub>; <sup>b</sup> NMVOC – niemetanowe lotne związki organiczne;

<sup>c</sup> emisja ze źródeł antropogenicznych / emisja ze źródeł naturalnych

Tab. 2. Emisja zanieczyszczeń z zakładów szczególnie uciążliwych oraz stopień redukcji wytworzonych zanieczyszczeń w Polsce

Województwo	Emisja w latach 2009 / 2008 / 2007 / 2005 / 2004 / 2000 (tys. ton)					Stopień redukcji (%)	
	pyłów	gazów <sup>a)</sup>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Pyłów	Gazów <sup>a)</sup>
POLSKA	61,7/76,8/ 94,8/110,5/ 123,2/180,5	1590,7/1785,4/ 2052,9/2007,3/ 2020,3/2083,2	472,6/603,6/ 828,2/855,5/ 867,2/1040,2	323,0/331,1/ 360,6/351,1/ 349,2/-	201534,9/214533,6 /221216,6/ 211698,9/211593,6	99,7/99,6/ 99,5/99,4/ 99,3/99,0	57,3/54,9/ 50,5/49,5/ 49,0/43,7
Dolnośląskie	5,2/6,4/ 6,7/8,0/ 8,6 / 20,6	85,4/87,9/ 98,5/107,4/ 91,4/111,3	54,9/54,1/ 60,9/60,5/ 56,3/72,6	18,5/19,0/ 20,9/23,2/ 22,8/-	15381,2/16780,7/ 16578,6/17941,4/ 16559,1/-	99,8/99,7/ 99,7/99,7/ 99,6/98,8	90,2/90,4/ 89,7/88,3/ 89,5/87,1
Kujawsko-pomorskie	4,5/5,2/ 5,3/7,1/ 7,7/14,2	51,7/59,1/ 67,3/63,5/ 65,1/75,2	22,0/24,2/ 28,3/29,5/ 31,5/35,4	12,1/12,8/ 14,9/14,1/ 14,4/-	6715,3/6907,3/ 7467,6/8082/ 8765,1/-	99,1/99,0/ 99,0/98,6/ 98,3/97,2	39,6/37,6/ 29,2/26,8/ 17,6/26,7
Lubelskie	3,0/3,4/ 4,7/6,7/ 6,7/8,0	33,0/32,9/ 38,6/38,3/ 38,3/40,9	14,9/15,6/ 18,8/19,1/ 19,0/21,8	8,5/9,6/ 10,5/10,8/ 11,1/-	4868,8/4872,4/ 5252,4/5245,4/ 5249,7/-	98,6/99,0/ 99,0/98,2/ 98,5/97,7	86,5/86,6/ 84,8/84,7/ 83,0/42,5
Lubuskie	1,4/1,4/ 1,6/2,8/ 3,1/4,8	26,1/29,1/ 36,6/32,9/ 33,5/23,0	2,9/2,7/ 3,3/5,2/ 5,2/6,0	2,5/2,2/ 2,2/2,9/ 2,8/-	1926,3/1813,2/ 1982,5/2156,4/ 2077,1/-	98,7/98,5/ 98,4/97,9/ 97,7/95,9	0,3/0,5/ 0,0/0,0/ 0,0/6,4
Łódzkie	4,6/6,8/ 7,8/7,9/ 7,4/12,1	135,6/144,4/ 180,8/220,8/ 230,2/327,9	64,9/76,7/ 113,7/150,4/ 159,3/256,3	53,6/51,2/ 50,4/53,2/ 49,9/-	34364,8/36140,3/ 33837,5/37305,2/ 36443,9/-	99,8/99,8/ 99,8/99,8/ 99,8/99,7	62,4/62,5/ 54,5/49,7/ 50,5/38,9
Małopolskie	4,3/5,7/ 7,3/ 9,3/ 12,4/16,7	139,4/156,2/ 183,6/179,2/ 187,5/201,5	28,2/34,5/ 56,4/56,4/ 52,8/65,0	19,9/22,0/ 25,5/24,9/ 23,9/-	10501,3/13136/ 15326,5/13608,7/ 12881,1/-	99,4/99,4/ 99,4/99,2/ 99,0/98,3	46,2/45,0/ 41,3/47,6/ 44,8/35,5
Mazowieckie	5,1/6,7/ 9,9 / 11,3 / 12,5 / 13,9	153,7/156,9/ 196,2/217,1/ 208,8/188,3	90,8/88,5/ 119,0/145,7/ 141,9/131,0	46,2/46,4/ 49,2/48,9/ 45,7/-	27781,4/27645,5 / 27879,7/27012,6 / 25932,9/-	99,6/99,6/ 99,3/99,2/ 99,1/98,9	39,5/40,4/ 24,3/16,8/ 19,1/4,5
Opolskie	3,1/3,1/ 3,9/3,8 / 4,4/7,7	61,4 9,8/ 63,0/51,8/ 52,7/57,5	12,4/12,5/ 13,6/12,3/ 12,5/18,0	22,7/23,1/ 25,0/20,9/ 21,3/-	13744,4/14210,9/ 15487/13221,1/ 13669,2/-	99,9/99,9/ 99,8/99,6/ 99,6/99,2	64,8/62,2/ 67,0/62,2/ 64,1/63,4
Podkarpackie	2,0/2,3/ 2,7/3,9/ 3,5/4,3	18,5/20,8/ 23,4/26,6/ 25,4/28,1	8,8/10,4/ 11,8/14,6/ 13,8/15,9	5,5/6,0/ 6,3/6,5/ 6,2/-	3383,7/3411,5/ 3522,6/3492,8/ 3611,5/-	98,7/98,7/ 98,5/98,6/ 98,6/98,0	35,6/29,6/ 24,5/13,8/ 14,5/23,2
Podlaskie	1,1/1,3/ 1,7/2,0/ 2,2/2,0	9,1/11,2/ 12,8/12,5/ 12,5/14,0	3,4/3,7/ 4,3/5,3/ 5,5/6,2	3,1/3,0/ 3,4/3,6/ 3,5/-	1588,5/1591,6/ 1703,4/1787,3/ 1861,6/-	98,4/98,4/ 98,5/98,3/ 98,2/98,1	8,2/5,8/ 10,3/11,2/ 10,9/4,8
Pomorskie	2,6/3,3/ 3,5/3,5/ 4,3/5,4	30,2/34,9/ 40,4/41,7/ 41,5 / 48,3	16,3/20,0/ 23,7/25,2/ 24,7/26,7	8,3/8,5/ 9,1/9,1/ 8,9/-	5397,6/5481,2/ 5938,3/6324,3/ 6196,5/-	99,1/98,9/ 98,9/98,9/ 98,5/98,3	57,3/56,4/ 51,6/47,6/ 46,8/39,4
Śląskie	11,7/14,1/ 21,8/22,4/ 26,5/38,5	644,9/695,2/ 754,1/713,7/ 719,0/610,6	83,4/94,9/ 152,1/146,5/ 153,2/152,3	61,7/64,5/ 75,4/72,2/ 74,7/-	37263,9/41976,9/ 45520,5/40166,5/ 41521,9/-	99,6/99,6/ 99,5/99,4/ 99,3/99,0	30,3/31,8/ 28,3/28,6/ 29,6/31,3
Świętokrzyskie	3,2/4,0/ 3,9/4,5/ 5,9/8,8	79,5/84,3/ 81,7/60,7/ 74,1/85,5	17,9/29,1/ 28,5/22,4/ 31,4/48,7	19,6/17,6/ 18,8/17,3/ 19,6/-	11623,9/11608,3/ 11968,1/9087,5/ 10417,3/-	99,8/99,8/ 99,8/99,7/ 99,5/99,4	39,5/36,1/ 38,8/32,3/ 29,0/25,4
Warmińsko-mazurskie	1,5/1,4/ 1,4/1,9/ 1,9/2,5	9,7/9,5/ 9,9/10,5/ 10,7/15,3	4,1/4,1/ 4,6/4,6/ 4,7/7,4	2,4/2,3/ 2,3/2,4/ 2,3/-	1431,3/1371,6/ 1395,7/1489,6/ 2371,7/-	97,2/98,4/ 96,8/96,6/ 96,1/95,3	2,6/2,6/ 1,4/2,8/ 2,7/14,5
Wielkopolskie	4,7/6,6/ 7,0/9,7/ 10,3/13,2	78,8/160,1/ 217,7/191,7/ 189,5/176,1	21,4/110,6/ 164,5/138,3/ 135,5/127,7	24,7/27,3/ 29,4/28,0/ 28,3/-	17516,8/18104,5/ 18076,6/16795,6/ 17100,8/-	99,6/99,4/ 99,4/99,2/ 99,2/98,9	64,2/28,8/ 6,5/9,9/ 7,8/7,9
Zachodniopomorskie	3,7/5,1/ 5,7/5,7/ 5,7/7,7	33,8/42,9/ 48,3/38,7/ 40,2/79,6	16,2/22,0/ 24,7/19,6/ 19,9/49,2	13,9/15,6/ 17,2/13,2/ 13,7/-	8045,7/9392/ 9279,2/8032,8/ 7934,1/-	99,4/99,4/ 98,9/98,5/ 98,8/98,8	44,0/43,8/ 40,7/46,5/ 47,6/17,2

Tab. 3. Emisja wybranych zanieczyszczeń gazowych z krajów europejskich [GUS 2010, 2009]

Kraj	Emisja SO <sub>2</sub> / NO <sub>x</sub> / CO / NMLZO (mln ton)				
	1995	1998	2001	2004	2006
UE-27	17,16 / 14,60 / 51,08 / 13,93	13,24 / 13,36 / 44,96 / 15,65	10,26 / 12,29 / 37,89 / 10,76	8,72 / 11,73 / 34,39 / 9,95	7,95 / 10,94 / 27,92 / 9,39
Austria	0,05 / 0,19 / 1,01 / 0,22	0,04 / 0,21 / 0,91 / 0,18	0,03 / 0,22 / 0,93 / 0,19	0,03 / 0,23 / 0,86 / 0,77	0,03 / 0,22 / 0,18 / 0,17
Belgia	0,26 / 0,37 / 1,11 / 0,31	0,21 / 0,31 / 1,11 / 0,27	0,17 / 0,32 / 1,01 / 0,24	0,16 / 0,30 / 0,90 / 0,75	0,14 / 0,26 / 0,21 / 0,15
Chorwacja	0,08 / 0,06 / 0,34 / 0,08	0,11 / 0,07 / 0,38 / 0,09	0,07 / 0,07 / 0,33 / 0,08	0,06 / 0,07 / 0,31 / 0,36	0,00 / 0,08 / 0,09 / -
Czechy	1,09 / 0,37 / 1,00 / 0,29	0,44 / 0,32 / 0,77 / 0,24	0,25 / 0,33 / 0,68 / 0,22	0,23 / 0,33 / 0,57 / 0,51	0,21 / 0,28 / 0,20 / 0,18
Dania	0,14 / 0,26 / 0,71 / 0,16	0,08 / 0,24 / 0,60 / 0,14	0,03 / 0,20 / 0,56 / 0,12	0,03 / 0,19 / 0,56 / 0,45	0,03 / 0,17 / 0,12 / 0,11
Estonia	0,12 / 0,04 / 0,21 / 0,05	0,10 / 0,04 / 0,20 / 0,04	0,09 / 0,04 / 0,19 / 0,04	0,09 / 0,04 / 0,17 / 0,17	0,07 / 0,03 / 0,04 / 0,03
Finlandia	0,10 / 0,26 / 0,44 / 0,19	0,09 / 0,25 / 0,45 / 0,17	0,09 / 0,22 / 0,60 / 0,16	0,08 / 0,20 / 0,55 / 0,50	0,09 / 0,18 / 0,14 / 0,13
Francja	0,97 / 1,65 / 9,57 / 2,37	0,82 / 1,55 / 8,34 / 2,13	0,56 / 1,52 / 6,57 / 1,81	0,49 / 1,43 / 6,18 / 4,67	0,45 / 1,35 / 0,06 / 1,34
Hiszpania	1,81 / 1,33 / 3,22 / 1,11	1,60 / 1,35 / 3,18 / 1,20	1,46 / 1,45 / 2,96 / 1,06	1,36 / 1,53 / 2,72 / 2,55	1,17 / 1,48 / 1,50 / 0,96
Holandia	0,13 / 0,47 / 0,86 / 0,33	0,09 / 0,40 / 0,76 / 0,26	0,07 / 0,37 / 0,62 / 0,20	0,06 / 0,34 / 0,58 / 0,53	0,06 / 0,28 / 0,17 / 0,16
Irlandia	0,16 / 0,13 / 0,32 / 0,10	0,18 / 0,13 / 0,33 / 0,11	0,13 / 0,14 / 0,23 / 0,08	0,07 / 0,12 / 0,19 / 0,17	0,06 / 0,12 / 0,06 / 0,06
Litwa	0,09 / 0,07 / 0,29 / 0,08	0,09 / 0,06 / 0,36 / 0,08	0,05 / 0,04 / 0,22 / 0,07	0,04 / 0,05 / 0,18 / 0,21	0,04 / 0,07 / 0,07 / 0,08
Łotwa	0,05 / 0,04 / 0,32 / 0,06	0,04 / 0,04 / 0,32 / 0,06	0,01 / 0,04 / 0,31 / 0,06	0,00 / 0,04 / 0,32 / 0,30	0,00 / 0,04 / 0,06 / 0,07
Niemcy	1,73 / 2,17 / 6,53 / 1,97	0,97 / 1,94 / 5,63 / 1,81	0,64 / 1,73 / 4,91 / 1,52	0,59 / 1,53 / 4,32 / 3,57	0,56 / 1,28 / 1,40 / 1,35
Norwegia	0,03 / 0,21 / 0,73 / 0,37	0,03 / 0,22 / 0,63 / 0,36	0,03 / 0,21 / 0,55 / 0,39	0,03 / 0,20 / 0,48 / 0,40	0,02 / 0,19 / 0,27 / 0,20
Polska	2,38 / 1,12 / 4,55 / 1,08	1,90 / 0,99 / 4,30 / 1,03	1,56 / 0,81 / 3,53 / 0,87	1,24 / 0,80 / 3,43 / 2,55	1,22 / 0,86 / 0,89 / 0,93
Portugalia	0,33 / 0,27 / 0,85 / 0,31	0,34 / 0,28 / 0,79 / 0,31	0,29 / 0,30 / 0,71 / 0,29	0,20 / 0,29 / 0,67 / 0,60	0,19 / 0,23 / 0,29 / 0,28
Słowacja	0,25 / 0,18 / 0,42 / 0,11	0,18 / 0,13 / 0,35 / 0,09	0,13 / 0,11 / 0,32 / 0,08	0,10 / 0,10 / 0,31 / 0,28	0,09 / 0,08 / 0,09 / 0,08
Słowenia	0,13 / 0,07 / 0,09 / 0,04	0,12 / 0,06 / 0,08 / 0,04	0,07 / 0,05 / 0,15 / 0,05	0,05 / 0,05 / 0,12 / 0,10	0,02 / 0,04 / 0,05 / 0,04
Szwecja	0,07 / 0,28 / 0,50 / 0,27	0,06 / 0,25 / 0,76 / 0,24	0,04 / 0,21 / 0,67 / 0,21	0,04 / 0,19 / 0,62 / 0,57	0,04 / 0,17 / 0,20 / 0,19
Szwajcaria	0,03 / 0,12 / 0,49 / 0,19	0,02 / 0,11 / 0,43 / 0,15	5,84 / 0,10 / 0,40 / 0,13	4,98 / 0,09 / 0,35 / 0,29	0,02 / 0,08 / 0,11 / 0,10
Węgry	0,71 / 0,19 / 0,76 / 0,15	0,59 / 0,20 / 0,74 / 0,14	0,40 / 0,18 / 0,58 / 0,16	0,25 / 0,19 / 0,59 / 0,51	0,12 / 0,19 / 0,16 / 0,18
Wielka Brytania	2,32 / 2,38 / 6,30 / 1,93	1,62 / 2,08 / 5,27 / 1,61	1,12 / 1,83 / 3,88 / 1,24	0,84 / 1,66 / 2,69 / 2,11	0,68 / 1,49 / 1,00 / 0,91
Włochy	1,32 / 1,81 / 7,17 / 2,00	1,00 / 1,55 / 6,20 / 1,78	0,70 / 1,35 / 5,06 / 1,43	0,50 / 1,18 / 4,18 / 3,33	0,39 / 1,15 / 1,26 / 1,17

Tab. 4 Zmienność emisji PM10 i PM2,5 w wybranych krajach europejskich w latach 2000-2009  
[EMEP 2011]

Kraj	Frakcja	Emisja (Gg)										Zmiana emisji (%)	
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2008-2009	2000-2009
UE-27	PM10	2274	2268	2123	2125	2136	2111	2059	2088	2052	1965	-4	-14
	PM2,5	1596	1583	1510	1493	1474	1432	1389	1354	1332	1273	-4	-20
Austria	PM10	39	39	38	38	38	39	37	36	37	35	-4	-9
	PM2,5	23	23	22	22	22	23	21	21	21	20	-5	-13
Belgia	PM10	45	45	44	44	42	35	34	29	28	22	-20	-51
	PM2,5	33	30	30	29	28	26	25	21	20	16	-21	-53
Chorwacja	PM10	13	13	14	16	17	17	16	16	15	14	-6	11
	PM2,5	9	9	10	12	12	12	11	11	10	10	-5	9
Czechy	PM10	n.d.	43	0	51	47	34	35	35	35	36	4	-
	PM2,5	n.d.	0	n.o.	38	35	21	22	21	21	20	-3	-
Dania	PM10	29	29	29	30	30	32	33	36	33	31	-8	7
	PM2,5	22	22	22	23	23	25	26	29	27	24	-9	12
Estonia	PM10	37	37	33	30	30	27	20	29	25	23	-8	-38
	PM2,5	21	22	23	21	22	20	15	20	20	19	-7	-13
Finlandia	PM10	47	54	55	55	57	51	55	48	53	52	-2	10
	PM2,5	37	38	39	38	38	34	35	34	38	38	-1	4
Francja	PM10	566	551	527	525	518	493	475	460	454	435	-4	-23
	PM2,5	381	370	348	346	338	319	303	290	285	270	-5	-29
Hiszpania	PM10	144	143	145	143	142	140	135	138	122	109	-11	-24
	PM2,5	100	99	99	99	98	97	94	96	87	77	-12	-23
Holandia	PM10	39	37	37	35	34	33	32	32	32	30	-6	-23
	PM2,5	24	23	22	21	20	19	18	18	17	16	-8	-34
Irlandia	PM10	18	18	17	16	17	17	16	15	15	14	-10	-24
	PM2,5	12	12	11	11	11	11	11	10	10	9	-9	-22
Litwa	PM10	27	29	29	30	39	33	32	33	32	33	2	23
	PM2,5	23	26	25	26	28	27	27	26	26	28	9	21
Łotwa	PM10	n.d.	1	n.o.	n.o.	11	11	11	12	12	12	-1	-
	PM2,5	n.d.	n.d.	n.o.	n.o.	9	9	9	10	10	10	-7	-
Niemcy	PM10	248	242	233	227	224	217	216	210	191	181	-5	-27
	PM2,5	143	140	133	129	127	122	120	114	106	100	-6	-30
Norwegia	PM10	65	65	67	64	60	58	55	53	50	49	-2	-25
	PM2,5	59	58	61	57	54	51	48	46	44	42	-2	-28
Polska	PM10	282	300	291	267	280	289	285	269	247	243	-2	-14
	PM2,5	135	142	142	142	134	138	136	134	122	120	-2	-28
Portugalia	PM10	116	123	109	104	112	115	108	106	106	106	0	-9
	PM2,5	87	86	79	78	82	81	78	79	77	76	-1	-12
Słowacja	PM10	45	48	41	37	33	47	41	35	34	33	-1	-26
	PM2,5	23	33	29	28	28	39	34	28	28	28	-1	21
Słowenia	PM10	19	19	19	18	18	19	18	18	17	16	-5	-19
	PM2,5	14	14	14	14	14	14	14	14	13	13	-5	-12
Szwecja	PM10	40	40	40	41	41	42	41	41	40	39	-3	-2
	PM2,5	28	28	28	29	29	29	29	29	28	27	-2	-3
Szwajcaria	PM10	23	23	22	22	22	22	22	21	21	21	-1	-10
	PM2,5	12	12	11	11	11	11	10	10	10	10	-3	-19
Węgry	PM10	47	43	44	48	47	52	48	36	38	48	26	2
	PM2,5	26	24	25	27	27	31	29	21	23	28	23	8
Wielka Brytania	PM10	174	167	145	143	141	137	136	133	129	119	-8	-32
	PM2,5	103	100	89	87	86	84	82	80	76	70	-8	-32
Włochy	PM10	209	208	193	191	196	182	179	185	180	173	-4	-18
	PM2,5	179	176	161	159	164	150	148	154	150	144	-4	-19

n.d. – niedostarczone dane do sieci EMEP; n.o. – nie oszacowano emisji



zmian techniczno-technologicznych, przyczyniających się do obniżenia kosztów produkcji, poprawy jakości wyrobu, a przede wszystkim do obniżenia uciążliwości przemysłu dla środowiska życia człowieka. Do zmian tych należy zaliczyć między innymi modernizację urządzeń wychwytyjących zanieczyszczenia pyłowe i gazowe, modernizację instalacji energetycznych, wprowadzanie nowych technologii produkcji, wykorzystanie w większym stopniu odnawialnych źródeł energii [IOS 2010a]. Ważną rolę odegrała również implementacja Dyrektywy IPPC, tj. wprowadzenie zintegrowanych pozwoleń środowiskowych oraz ustaleniem w tych pozwoleń wymagania opartych o zasadę stosowania najlepszych dostępnych technik (BAT) [PE 2008].

Poprawa jakości powietrza jest obserwowana w całej Europie – działania podejmowane na różnych szczeblach przyczyniły się do znacznej redukcji emisji pyłów i gazów ze źródeł antropogenicznych [EEA 2009, 2010, 2011a; EMEP 2011; RP 2011]. W raporcie Europejskiej Agencji Środowiska 2009 r. [EEA 2009] opisującym trendy emisyjne głównych zanieczyszczeń powietrza (NO<sub>x</sub>, CO, NMVOCs, SO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, PM10 i PM2,5) w okresie 1990-2007 stwierdzono że na obszarze UE największą redukcję emisji odnotowano dla SO<sub>x</sub> (w 2007 emisja była mniejsza o 72% niż w 1990). Emisja innych zanieczyszczeń również się zmniejszyła w omawianym okresie, w tym między innymi: CO o 57%, NMVOCs o 47% i NO<sub>x</sub> o 36%. Pomimo, że ilość zanieczyszczeń wprowadzanych do atmosfery uległa w Polsce obniżeniu, to jednak nadal odbiega od średnich wartości w krajach UE (tab. 3). Raport EEA z 2011 r. [EEA 2011a] podaje, że w 2009 r. emisja NO<sub>x</sub> stanowiła ok. 9% (819,5 Gg) całkowitej emisji NO<sub>x</sub> z krajów EU-27 (miejsce 6/26 krajów), emisja NMVOC – ok. 8% (615,0 Gg; miejsce 6), emisja SO<sub>2</sub> – ok. 17% (861,3 Gg; miejsce 1), a emisja NH<sub>3</sub> – ok. 7% (273,4 Gg; miejsce 6). Polska ma również znaczny udział w emisji PM10 i PM2,5 (tab. 4).

Tab. 5 Zużycie ogółem nośników energii pierwotnej w gospodarce narodowej Polski

Wyszczególnienie	Zużycie [TJ]								
	1988 <sup>a</sup>	2000	2002	2003	2004	2005	2007	2008	2009
OGÓŁEM	5 353 466	3 847 603	3 819 555	4 020 987	3 913 147	3 970 438	4 152 725	4 208 838	3 978 907
Węgiel kamienny	3 628 603	1 940 687	1 905 021	2 056 671	1 883 421	1 907 363	2 015 571	1 960 986	1 772 583
Węgiel brunatny	592 337	507 526	507 244	516 866	540 901	532 820	499 591	532 682	509 762
Ropa naftowa	618 685	768 502	760 178	742 034	767 861	772 833	851 014	894 157	861 845
Gaz ziemny	436 920	452 713	458 713	509 530	526 281	551 007	553 600	563 172	552 567
Torf i drewno opałowe	35 231	123 405	123 405	130 168	131 470	131 474	129 013	152 628	167 220
Energia odnawialna <sup>b)</sup>	6 455	7 723	7 723	6 779	8 325	8 888	10 867	11 950	13 869
Paliwa odpadowe stałe i inne surowce <sup>c)</sup>	35 235	47 047	47 047	58 939	54 889	66 053	87 011	93 263	101 061

<sup>a</sup> Rok bazowy do oceny zobowiązań Polski wynikających z Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu

<sup>b</sup> Energia wody, wiatru, słoneczna, geotermalna, pompy ciepła

<sup>c</sup> Półprodukty rafineryjne niebędące produktami przerobu ropy naftowej (alkohole, dodatki uszlachetniające itp.), gaz gnilny (biogaz), paliwa odpadowe stałe przemysłowe i komunalne oraz pozostała biomasa

Jedną z głównych przyczyn zaistniałej sytuacji jest wyjątkowo niekorzystna struktura użytkowania paliw dla celów energetycznych w Polsce (tab. 5) [GUS 2010, 2005], ściśle związana z posiadanymi przez RP znacznymi zasobami: węgla kamiennego i brunatnego oraz w mniejszym zakresie zasobami gazu ziemnego [POOIS 2007]. Choć monokultura węglowa odchodzi w przeszłość, struktura zużycia pierwotnych nośników energii w Polsce nadal odbiega od tej, która występuje w Europie Zachodniej [Koniecznyński 2005]. Co więcej, spalanie węgla pozostaje głównym źródłem krajowej emisji do powietrza większości zanieczyszczeń stałych i gazowych. Na skutek spalania węgla, do powietrza wydzielą się znaczna ilość cząstek pyłu, w tym cząstki bardzo drobne. Pomimo tego, że popioły lotne mogą być wychwytywane z gazów spalinowych przez systemy filtrów odpylających o skuteczności ok. 98%, ilość emitowanych do atmosfery pyłów nadal pozostaje duża [PE 2008; Koniecznyński 2005].

Szczególnego znaczenia nabiera ograniczenie spalania węgla w piecach domowych w celu ogrzewania mieszkań i przygotowania posiłków. Obserwowane od wielu lat zmniejszenie emisji przemysłowej uwypukliło problem tzw. niskiej emisji [IOŚ 2010a]. Ponieważ w odróżnieniu od kotłów energetycznych i ciepłowniczych, praktycznie cała emisja z pieców domowych odbywa się bez ograniczenia do atmosfery i przez niskie emitory, stąd też ten sposób użytkowania węgla stanowi największe zagrożenie powietrza, zwłaszcza w starych dzielnicach miejskich [Koniecznyński 2005].

Coraz większe zagrożenie ekologiczne, szczególnie w wielkich miastach, stwarzają również środki transportu oraz odpady komunalne. Z uwagi na duże zagęszczenie ulic i tras komunikacyjnych na terenach miejskich, a także systematyczny wzrost liczby zarejestrowanych pojazdów (tab. 6) [GUS 2010, 2009, 2005], emisja komunikacyjna ma znaczący udział w ogólnej emisji zanieczyszczeń, zwłaszcza emisji tlenków azotu, pyłów i węglowodorów [IOŚ 2010a; RP 2010, GUS 2010, 2009, 2005] (tab. 7).

Tab. 6. Pojazdy samochodowe i ciągniki w Polsce

Wyszczególnienie	Ilość (tysiące sztuk)								
	1990	1995	2000	2002	2005	2006	2007	2008	2009
OGÓLEM	9041	11186	14106	15525	16816	18035	19472	21337	22025
Samochody osobowe	5261	7517	9991	11029	12339	13384	14589	16080	16495
Autobusy	92	85	82	83	80	83	88	92	95
Samochody ciężarowe <sup>a</sup>	1045	1354	1879	2163	2305	2393	2521	2710	2797
Motocykle i skutery	1357	929	803	869	754	784	825	909	975
Ciągniki rolnicze	1192	1212	1253	1293	1242	1287	1338	1422	1530

<sup>a</sup> łącznie z ciągnikami siodłowymi i samochodami ciężarowo-osobowymi

Stan powietrza w Polsce zależy głównie od wielkości i przestrzennego rozkładu emisji ze źródeł stacjonarnych i mobilnych, po uwzględnieniu przepływów transgranicznych i przemian fizykochemicznych zachodzących w atmosferze. Procesy te mają wpływ zarówno na kształtowanie się tzw. tła zanieczyszczeń, które jest wynikiem ustalania się stanu równowagi dynamicznej w dalszej odległości od

źródeł emisji, jak i na występowanie podwyższonych stężeń w rejonie bezpośredniego oddziaływania emitorów [GIOŚ 2010]. Jak wspomiano, w Polsce, podobnie jak w Europie, emisja praktycznie wszystkich zanieczyszczeń powietrza znacznie zmniejszyła się w ostatnich latach, skutkując poprawą jakości powietrza [IOŚ 2010b-d; EEA 2010; EEA 2007]. Mimo to narażenie na niektóre zanieczyszczenia powietrza nadal jest wysokie.

Tab. 7. Emisja zanieczyszczeń ze środków transportu w Polsce (źródło: dane Instytutu Transportu Samochodowego)

Wyszczególnienie	Emisja (Gg)							
	1991	1995	2000 <sup>a</sup>	2002 <sup>a</sup>	2005 <sup>a</sup>	2006 <sup>a</sup>	2007 <sup>a</sup>	2008 <sup>a</sup>
Dwutlenek węgla	27641	32280	28942	28179	32734	34637	36116	39862
Metan	8,38	9,55	4,20	4,40	3,63	3,81	4,25	5,17
Podtlenek azotu	1,46	1,59	1,93	1,88	2,24	2,36	2,45	2,67
Tlenek węgla	1252,8	1219,3	717,5	626,0	601,3	687,0	711,2	718,5
NMLZO	320,1	301,6	148,2	117,7	98,8	100,3	96,9	98,3
Tlenki azotu	445,8	449,8	251,5	236,5	224,1	243,5	249,4	256,3
Cząstki stałe	26,92	28,73	17,90	15,75	15,79	16,52	17,76	18,95
Dwutlenek siarki	40,51	24,97	14,98	6,97	1,09	1,16	1,20	1,32
Ołów	0,67	0,42	0,041	0,032	0,019	0,020	0,020	0,021

<sup>a</sup> Emisja tylko ze źródeł transportu drogowego

Obecnie za najbardziej problematyczne zanieczyszczenia, co do ich skutków dla zdrowia, uznaje się atmosferyczny pył zawieszony (PM) i ozon troposferyczny (O<sub>3</sub>). Zarówno krótko- jak i długotrwałe narażenie na te substancje może powodować różne szkodliwe skutki zdrowotne, od niegroźnych stanów zapalnych układu oddechowego aż po poważne choroby oddechowe i sercowo-naczyniowe czy przedwczesną śmierć [EEA 2010].

Tendencje emisji PM były dość zgodne wśród krajów europejskich (tab. 4) [EMEP 2011]; w większości krajów odnotowano spadek emisji PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>. Najwyższe stężenia PM<sub>10</sub> w miastach rejestrowano w Belgii, Bułgarii, Czechach, Grecji, Węgrzech, Włoszech, Luksemburgu, Holandii, Polsce, Portugalii, Rumunii i Hiszpanii oraz zachodnich krajów bałkańskich [EEA 2007]. Warto jednak zwrócić uwagę, że w krajach Europy Wschodniej i Zachodniej<sup>2</sup> różne były źródła PM [EMEP 2010]. W obu przypadkach dominującym źródłem PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> był sektor *Spalanie stacjonarne dla celów grzewczych*, który stanowił 29% emisji PM<sub>10</sub> w Europie Wschodniej i 19% w Europie Zachodniej. Dla PM<sub>2,5</sub> było to odpowiednio 34% i 27%. Ponadto w Europie Wschodniej duży udział miała również produkcja energii elektrycznej i ciepłej oraz spalanie stacjonarne w zakładach

<sup>2</sup> Kraje Europy Wschodniej: Albania, Armenia, Azerbejdżan, Bośnia i Hercegowina, Bułgaria, Białoruś, Chorwacja, Cypr, Czarnogóra, Czechy, Estonia, Gruzja, Kirgistan, Kazachstan, Litwa, Łotwa, Macedonia, Mołdawia, Polska, Rosja, Rumunia, Serbia, Słowacja, Słowenia, Turcja, Ukraina, Węgry; Kraje Europy Zachodniej: Austria, Belgia, Dania, Finlandia, Francja, Grecja, Hiszpania, Holandia, Irlandia, Islandia, Liechtenstein, Luksemburg, Malta, Monako, Niemcy, Norwegia, Portugalia, Szwajcaria, Szwecja, Wielka Brytania, Włochy

produkcyjnych (łącznie 10% – PM10 i 12% – PM2,5). Udział źródeł mobilnych w krajach zachodniej Europy był większy (13% – PM10 i 15% – PM2,5) niż w regionie wschodnim (7% – PM10 i 7% – PM2,5) [EMEP 2010].

Jak wynika z rocznej oceny jakości powietrza w 2009 r., najwięcej stref – ok. 46% (79 ze 170) zakwalifikowano do programu ochrony powietrza (POP) właśnie ze względu na pył PM10 [IOŚ 2010c]. W strefach zaliczonych do klasy C zawsze były przekroczone poziomy dopuszczalne dla stężeń dobowych, w części z nich jednocześnie wystąpiło przekroczenie dopuszczalnych stężeń średnich rocznych. Duża liczba stref zaliczanych do klasy C ze względu na pył PM10 w 2009 r. i w latach poprzednich świadczy o problemach z dotrzymaniem norm dla tego zanieczyszczenia. Problemy z ich przekraczaniem występują także w innych krajach Europy [IOŚ 2010c].

Przekroczenia dopuszczalnych wartości dobowych i rocznych stężeń PM10 najczęściej zdarzają się w okresie zimowym. Jako najważniejszą przyczynę najczęściej wskazywano oddziaływanie emisji związanych z indywidualnym ogrzewaniem budynków (odpowiednio 69% i 82% przekroczeń dopuszczalnej wartości dobowej i rocznej). Znacznie rzadziej jako przyczynę przekroczeń podawano oddziaływanie emisji związanej z ruchem pojazdów (odpowiednio 11% i 7% przekroczeń dopuszczalnej wartości dobowej i rocznej) oraz emisji z zakładów przemysłowych, ciepłowni, elektrowni zlokalizowanych w pobliżu stacji pomiarowej (odpowiednio 7,6% i 9% przekroczeń dopuszczalnej wartości dobowej i rocznej) [IOŚ 2010c].

W 2008 r. weszła w życie dyrektywa 2008/50/WE narzucająca bardzo ostre wymagania co do stężenia dopuszczalnego dla drobnych pyłów (PM2,5) i wymuszająca znaczące ograniczenie narażenia ludności na ich oddziaływanie. Badania PM2,5 w Europie mają stosunkowo krótką historię. Wstępne analizy wykonane w ramach CAFE wykazały znaczące regionalne różnice w składzie chemicznym PM, wynikające z emisji pyłu z różnych źródeł lokalnych oraz z emisji związanej z transportem i przemianami prekursorów PM w skali globalnej [EMEP 2011]. Zarówno pomiary jak i obliczenia modelowe wskazują, że udział drobnej frakcji w PM10 jest największy w Europie Środkowej (0,6-0,8), co jest spowodowane dominacją źródeł antropogenicznych. Udział PM2,5 jest mniejszy na stanowiskach w Europie Południowej ze względu na dużą rolę pyłu eolicznego i mineralnego [EMEP 2011].

W Polsce badania PM2,5 są prowadzone systematycznie od 2000 r. w różnych punktach, w ramach sieci WIOŚ i prac badawczo-rozwojowych. Choć obecnie wiadomo, że frakcja pyłu drobnego PM2,5 ma poważniejsze skutki zdrowotne niż PM10 dane monitoringowe dotyczące PM2,5 są nadal ograniczone [EEA 2007]. Wstępną ocenę jakości powietrza dla PM2,5 wykonały wojewódzkie inspektoraty ochrony środowiska w roku 2009. W jej wyniku żadna ze stref nie uzyskała klasy 1, jedynie trzem strefom przypisano klasę 2, a klasy 3a i 3b uzyskały łącznie 43 strefy [IOŚ 2010b].

Jak wskazuje EEA [2010], rok 2008 był pierwszym, jeśli chodzi o obowiązek monitorowania stężeń metali ciężkich i wielopierścieniowych węglowodorów aro-

matycznych (WWA). W ocenie jakości powietrza wskaźnikiem poziomu zanieczyszczenia powietrza WWA jest benzo(a)piren (BaP) oznaczany w pyłe zawieszonym PM10 [GIOŚ 2010]. Wysokie poziomy BaP występują w niektórych regionach Europy, w tym w Czechach i Polsce [EEA 2010].

W 2009 roku, podobnie jak rok i dwa lata wcześniej, BaP był substancją, której wartość normatywna została przekroczona na największej liczbie stanowisk (spośród uwzględnionych w ocenie) w skali kraju [IOŚ 2010d). Raport Instytutu Ochrony Środowiska (IOŚ) dotyczący rocznej oceny jakości powietrza wskazuje, że przekroczenie wartości kryterialnej – poziomu docelowego, wynoszącego  $1 \text{ ng/m}^3$  (stężenie średnie roczne) wystąpiło w 73 strefach ze 170 (ok. 43%). Do klasy C zaliczono wszystkie strefy województwa małopolskiego, mazowieckiego i śląskiego oraz większość stref województwa podkarpackiego i pomorskiego. Występowanie przekroczeń poziomu docelowego BaP wiąże się z jednej strony z jego bardzo małą wartością, z drugiej zaś z emisją BaP z licznych źródeł w sektorze komunalnym i mieszkaniowym, głównie w sezonie zimowym [IOŚ 2010c]. Najczęściej wymienianą przyczyną przekroczeń jest oddziaływanie emisji związanych z indywidualnym ogrzewaniem budynków (95% przekroczeń). Na drugim miejscu, ze znacznie mniejszym udziałem procentowym (po ok. 4%), znajdują się oddziaływanie emisji z zakładów przemysłowych, ciepłowni, elektrowni zlokalizowanych w pobliżu stacji pomiarowej i emisji związanej z ruchem pojazdów [IOŚ 2010c].

Z uwagi na wielkoobszarowy charakter zanieczyszczenia powietrza ozonem, można przypuszczać, że obszar przekroczeń wartości normatywnej (poziomu docelowego) w przypadku ozonu jest większy niż dla innych zanieczyszczeń, w tym BaP i PM10 [IOŚ 2010c]. W Polsce w latach 1986-2007 wyraźnie zmniejszyło się zużycie substancji zubożających warstwę ozonową (freonów i halonów), co stanowi istotny wkład w działania na rzecz ochrony warstwy ozonowej w skali globalnej [GIOŚ 2010]. Ozon jest zanieczyszczeniem wtórnym powstałym w troposferze w złożonych reakcjach prekursorów gazowych, takich jak  $\text{NO}_x$  i VOC, indukowanych światłem. We wcześniejszych latach wartość progowa  $120 \text{ }\mu\text{g/m}^3$  (stężenie 8-godzinne) była przekraczana we wszystkich krajach europejskich. W 2010 roku przekroczenie wartości progowej przez ponad 25 dni stwierdzono również w znacznej części Europy (17 krajów UE), w tym w Polsce [EEA 2011b].

Stężenia ozonu w Polsce zależą przede wszystkim od warunków pogodowych oraz zawartości ozonu i jego prekursorów w powietrzu napływającym w sezonie ciepłym nad Polskę. Z uwagi na zmienność wspomnianych warunków w kolejnych latach, z roku na rok zmienia się też stopień zanieczyszczenia powietrza ozonem (IOŚ 2010d). Najczęściej, jako przyczyna występowania wysokich stężeń 8-godzinnych ozonu, przewyższających  $120 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ , były podawane [IOŚ 2010c]:

- oddziaływania naturalnych źródeł emisji lub zjawisk naturalnych nie związanych z działalnością człowieka;
- napływ zanieczyszczeń powietrza z innych obszarów (w tym spoza Polski);
- niekorzystne warunki klimatyczne;
- przemiany fotochemiczne na skutek dużego promieniowania słonecznego.

Biorąc pod uwagę liczbę dni z przekroczeniami wartości 8-godzinnego stężenia ozonu, tj.  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , od 2004 do 2006 roku zauważalna była tendencja rosnąca. W 2006 roku średnia liczba takich dni wynosiła 31,3, co oznacza, że zbliżyła się do rekordowej zanotowanej w 2003 r., a w 2007 r. była zbliżona do tej z 2005 roku. W 2008 roku uśredniona liczba dni z przekroczeniami  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zmniejszyła się w niewielkim stopniu w stosunku do roku poprzedniego i była dużo mniejsza niż w rekordowych latach 2003 i 2006. W roku 2009 dni ze stężeniami 8-godzinnymi ozonu większymi od  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  było najmniej od 1997 roku – średnio 12 dni [IOŚ 2010d].

Wykonana w 2010 r. pięcioletnia ocena jakości powietrza w strefach w poszczególnych województwach [IOŚ 2010b] ujawniła, że zanieczyszczenia, dla których wyniki są najmniej korzystne, to: pył zawieszony PM10, ozon, BaP, a także dodatkowo PM2,5 (tab. 8). Dla tych zanieczyszczeń także w kolejnych rocznych ocen jakości powietrza w strefach najczęściej stwierdzano przekroczenia wartości kryterialnych. Podlegają one, w związku z tym, największym wymaganiom w zakresie prowadzenia pomiarów wysokiej jakości, zwłaszcza na obszarach występowania przekroczeń [IOŚ 2010b].

Należy także wspomnieć, że szczególnie istotna ze względu na wielowymiarowy i globalny charakter jest problematyka zmian klimatu [GIOŚ 2010; PE 2008]. Polska jako członek UE uczestniczy w realizacji szeregu działań mających na celu redukcję emisji gazów cieplarnianych, w tym na rzecz zintegrowania polityki klimatycznej, ochrony powietrza i energetycznej przez wdrożenie pakietu energetyczno-klimatycznego, a przeciwdziałanie zmianom klimatu jest jednym z najważniejszych celów polityki ekologicznej Polski [GIOŚ 2010]. RP będąc stroną Protokołu z Kioto<sup>3</sup> przyjęła zobowiązania do zredukowania emisji gazów cieplarnianych (dwutlenku węgla  $\text{CO}_2$ , metanu  $\text{CH}_4$ , podtlenku azotu  $\text{N}_2\text{O}$ ) o 6% w stosunku do emisji tych gazów z 1988 r. [RP 2010]. Przemiany polityczno-gospodarcze zachodzące po 1990 r. spowodowały, że warunek ten RP wypełnia z dużym nadmiarem (PE 2008). W latach 1988-2007 redukcja emisji gazów cieplarnianych wynosiła ok. 30% [GIOŚ 2010; RP 2010], na skutek wdrażania nowoczesnych technologii w przemyśle oraz wprowadzania wielu instrumentów, w tym prawnych, promujących rozwiązania niskoemisyjne i energooszczędne [GIOŚ 2010; RP 2010].

Pomimo obserwowanych ogólnych pozytywnych trendów w zakresie ograniczenia presji na środowisko wciąż pozostaje jeszcze wiele do zrobienia. Polska gospodarka pozostaje jedną z bardziej materiało- i energochłonnych w UE. Można jednak przewidywać, że rachunek ekonomiczny coraz bardziej będzie wpływał na wprowadzanie eko-innowacji i oszczędności surowców i energii w przedsiębiorstwach [GIOŚ 2010].

Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na środowisko jest bardzo ważne także dlatego, że zanieczyszczenie środowiska wywiera negatywny wpływ na

---

<sup>3</sup> Protokół z Kioto do Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, sporządzony w Kioto dnia 11 grudnia 1997 r. (Dz. U. 2005 Nr 203 poz. 1684) w ramach Konwencji ONZ o ochronie klimatu Ziemi

Tab. 8. Liczba stref, które uzyskały określone klasy w pięcioletniej ocenie jakości powietrza (2005-2009) dla SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, O<sub>3</sub>, PM10, Pb, As, Cd, Ni, BaP, PM2,5 w poszczególnych województwach – klasy wynikowe, ochrona zdrowia

Województwo		dolnośląskie	kujawsko-pomorskie	lubelskie	lubuskie	łódzkie	małopolskie	mazowieckie	opolskie	podkarpackie	podlaskie	pomorskie	śląskie	świętokrzyskie	warmińsko-mazurskie	wielkopolskie	zachodniopomorskie	Suma	
Liczba stref w województwie		4	4	2	3	2	3	4	2	2	2	2	5	2	3	3	3	46	
Liczba stref, które uzyskały określone klasy w pięcioletniej ocenie jakości powietrza	SO <sub>2</sub>	1	2	3	2				2	2	2	1		2	3	3	3	28	
		2	1	1		2		4				1						9	
		3a	1				1						5					7	
		3b					2												2
	NO <sub>2</sub>	1	2	2	1	3						1		1	3	2	2	2	17
		2	1	1	1		1	2	3	2	2	1	2	1	1		1		19
		3a					1							3					4
		3b	1	1				1	1					1				1	6
	CO	1	4	1	2	3	2		2	2	2	2	2	2	2	3	1	3	33
		2	2					2	2					3			2		11
		3a	1					1											2
		3b																	0
	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1	1	1		3	2		1		1	1	1		1	3		3	18
		2	2	1	2			1	3	1		1	1		1		2		15
		3a	1					1			1			5			1		9
		3b		2				1		1									4
	O <sub>3</sub>	1		2															2
		3	4	2	2	3	2	3	4	2	2	2	2	5	2	3	3	3	44
	PM10	1																	0
		2																1	1
		3a	1			1						2				3			7
		3b	3	4	2	2	2	3	4	2	2		2	5	2		3	2	38
	Pb	1	3	4	2	3	2	3	4	2	2	2	2	5	2	3	3	3	45
		2																	0
		3a	1																1
		3b																	0
	As	1		3	2	3	2	3	4		2	2		1	2	3	3	3	33
		2	2	1						2				4					9
		3	2										2						4
	Cd	1	4	2	2	2	2	3	4	1	1	2	2	4	2	3	3	3	40
		2				1				1	1			1					4
		3																	2
	Ni	1	4	4	2	3	2	3	4	2	2	2	2	5	2	3	3	3	46
		2																	0
		3																	0
	BaP	1										1							1
		2			2											2			4
		3	4	4		3	2	3	4	2	2	1	2	5	2	1	3	3	41
	PM2,5	1																	0
		2	1															1	3
3a		2	2	2	2			3			1	2		1	2	2	2	21	
3b		1	2		1	2	3	1	2	2	1		5	1		1		22	



zdrowie ludzi. Biorąc pod uwagę obecny stan zanieczyszczenia powietrza w Polsce oraz konieczność dotrzymania norm jakości powietrza ustanowionych w dyrektywie 2008/50/WE i limitów emisji zanieczyszczeń do powietrza dla dużych źródeł energetycznego spalania, przed Polską stoi zadanie realizacji wielu przedsięwzięć służących poprawie jakości powietrza. Podstawową regulacją ww. dyrektywy jest wprowadzenie nowych norm jakości powietrza dotyczących drobnych cząstek pyłu zawieszonego (PM<sub>2,5</sub>) w powietrzu oraz zweryfikowanie i konsolidacja istniejących aktów unijnych w zakresie ochrony powietrza [GIOŚ 2010]. Należy również podkreślić, iż ochrona powietrza wymaga synergii działań w ramach wielu polityk i sektorów zarówno w skali lokalnej, jak i globalnej. Zwłaszcza istotne jest zapewnienie spójności działań na rzecz ochrony powietrza z zadaniami mającymi na celu przeciwdziałanie zmianom klimatu.

### **Literatura**

- EEA, 2007, Report, No2/2007, Air pollution in Europe 1990-2004
- EEA, 2009, Technical report, No 8/2009, European Community emission inventory report 1990-2007 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP)
- EEA, 2010, The European Environment, State and Outlook 2010, Air pollution
- EEA, 2011a, Technical report, No 3/2011, NEC Directive status report 2010, Reporting by the Member States under Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants
- EEA, 2011b, , Technical report, No 6/2011, Air pollution by ozone across Europe during summer 2010, Overview of exceedances of EC ozone threshold values for April-September 2010
- EMEP, 2010, Status Report 4/2010, Transboundary particulate matter in Europe
- EMEP, 2011, Status Report 4/2011, Transboundary particulate matter in Europe
- GIOŚ, 2010, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Raport o stanie środowiska w Polsce 2008, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa
- GUS, 2005, Główny Urząd Statystyczny, Ochrona Środowiska 2005, Informacje i opracowania statystyczne, Warszawa
- GUS, 2006, Główny Urząd Statystyczny, Ochrona Środowiska 2006, Informacje i opracowania statystyczne, Warszawa
- GUS, 2008, Główny Urząd Statystyczny, Ochrona Środowiska 2008, Informacje i opracowania statystyczne, Warszawa
- GUS, 2009, Główny Urząd Statystyczny, Ochrona Środowiska 2009, Informacje i opracowania statystyczne, Warszawa
- GUS, 2010, Główny Urząd Statystyczny, Ochrona Środowiska 2010, Informacje i opracowania statystyczne, Warszawa
- IOŚ, 2010a, Inspekcja Ochrony Środowiska, Krajowy Raport Mozaikowy, Stan środowiska w województwach w latach 2000-2007, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa
- IOŚ, 2010b, Inspekcja Ochrony Środowiska, Wyniki pięcioletniej oceny jakości powietrza w strefach w Polsce wykonanej na potrzeby ustalenia odpowiedniego sposobu ocen rocznych zgodnie z art. 88 ustawy z dnia 27.04.2001 r. – Prawo ochrony środowiska, Zbiorczy raport krajowy z pięcioletniej oceny jakości powietrza w strefach wykonanej w 2010 roku przez WIOŚ, Warszawa
- IOŚ, 2010c, Inspekcja Ochrony Środowiska, Ocena jakości powietrza w strefach w Polsce za rok 2009, Zbiorczy raport krajowy z rocznej oceny jakości powietrza w strefach wykonywanej przez WIOŚ wg zasad określonych w art. 89 ustawy – Prawo ochrony środowiska, Warszawa

- IOŚ, 2010d, Inspekcja Ochrony Środowiska, Jakość powietrza w Polsce w roku 2009 w świetle wyników pomiarów prowadzonych w ramach PMŚ, Warszawa
- Koniecznyński J., 2004, Ochrona powietrza przed szkodliwymi gazami: metody, aparatura i instalacje; Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice
- Koniecznyński J., 2005, Emisja zanieczyszczeń z kotłów fluidalnych. IPIŚ PAN, Work&Studies (Prace i Studia) Nr 66
- PE 2008, Polityka ekologiczna Państwa w latach 2009-2012 z perspektywą do roku 2016. Warszawa
- POIS 2007, Ministerstwo Rozwoju Regionalnego, Program Operacyjny Infrastruktura i Środowisko, Narodowe Strategiczne Ramy Odniesienia 2007-2013, Wersja zaakceptowana przez Komisję Europejską 5 grudnia 2007 r.
- RP 2011, Rzeczpospolita Polska, Raport z wdrażania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2001/81/WE z dnia 23 października 2001 r. w sprawie krajowych pułapów emisji niektórych zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego za rok 2009 i projekcja emisji na rok 2010, Warszawa, marzec 2011
- RP 2010, Rzeczpospolita Polska, Piąty Raport Rządowy dla Konferencji Stron Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie Zmian Klimatu, Warszawa
- Ustawa z dnia 20 lipca 1991r. o Inspekcji Ochrony Środowiska, Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 28 lutego 2007 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu. Dz. U. 2007 Nr 44 poz. 287 z późn. zm.

## **System monitoringu jakości powietrza**

*Barbara Toczko*

System oceny jakości powietrza funkcjonuje jako jeden z elementów Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ) obejmującego diagnozowanie stanu różnych elementów przyrodniczych. Celem systemu jest uzyskiwanie informacji i danych dotyczących stężeń substancji w otaczającym powietrzu oraz wyników analiz i ocen w zakresie przestrzegania norm jakości powietrza. Dane pozyskane w ramach systemu stanowią podstawę do zarządzania jakością powietrza w kraju między innymi poprzez plany i programy ochrony powietrza. Dodatkowo, w ramach obowiązków sprawozdawczych Polski, uzyskiwane dane są przekazywane do Komisji Europejskiej, Europejskiej Agencji Środowiska oraz do organów konwencji międzynarodowych.

Polska jako kraj członkowski UE jest zobligowana do zapewnienia dotrzymania unijnych standardów jakości powietrza, w szczególności przez zapewnienie lub/i utrzymanie poziomów substancji w powietrzu poniżej dopuszczalnych/docelowych dla nich poziomów lub co najmniej na tych poziomach.

Zgodnie z zapisami ustawy Prawo ochrony środowiska [Ustawa ... 2001] wojewódzcy inspektorzy ochrony środowiska są odpowiedzialni za organizację i funkcjonowanie systemu monitoringu i oceny jakości powietrza. Wojewódzki inspektor ochrony środowiska jest odpowiedzialny za pomiary i ocenę poziomu substancji w powietrzu. Koordynacyjna rola i wykonywanie ocen w skali kraju jest zadaniem Głównego Inspektora Ochrony Środowiska.

W rocznej ocenie jakości powietrza uwzględnia się substancje, dla których w prawie krajowym w dyrektywach unijnych (2008/50/WE oraz 2004/107/WE) określono normatywne stężenia – w postaci poziomów dopuszczalnych/docelowych/ celu długoterminowego – w powietrzu, ze względu na ochronę zdrowia ludzkiego i ochronę roślin.

Oceny roczne jakości powietrza począwszy od oceny za 2010 rok są wykonywane w oparciu o podział Polski na 46 stref. Strefę stanowi: aglomeracja o liczbie mieszkańców powyżej 250 tys. (12 stref); miasto o liczbie mieszkańców powyżej 100 tys. (18 stref) i pozostały obszar województwa, niewchodzący w skład miast powyżej 100 tys. mieszkańców oraz aglomeracji (16 stref). Oceny pod kątem kryteriów ochrony zdrowia ludzkiego są wykonywane dla wszystkich stref. Z oce-

ny dokonywanej na podstawie kryteriów ustanowionych w celu ochrony roślin są wyłączone obszary aglomeracji i miast o liczbie mieszkańców powyżej 100 000.

Podstawą ocen rocznych są dane uzyskane w ramach PMŚ, tj. wyniki pomiarów ze stanowisk automatycznych, manualnych i pasywnych, wyniki modelowania, dane uzyskane z metod szacowania, m.in. przez porównywanie wyników stężeń zanieczyszczeń na obszarach o podobnym charakterze, inwentaryzację emisji. Przepisy określają minimalne wymagania dotyczące doboru metod wykorzystywanych do oceny w zależności od poziomu stężeń, minimalną liczbę stałych punktów pomiarowych, kryteria lokalizacji stacji, metodyki referencyjne poboru próbek i analiz poziomów substancji oraz wymagania, jakie muszą spełniać wyniki pomiarów ciągłych, okresowych, wyniki modelowania jakości powietrza oraz obiektywne metody szacowania.

Obecnie w ramach systemu oceny jakości powietrza są monitorowane stężenia zanieczyszczeń gazowych: SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, CO, pyłowych: PM10 i PM2,5 oraz zanieczyszczeń oznaczanych w pyłe PM10: ołowiu (Pb), arsenu (As), kadmu (Cd), niklu (Ni) i benzo(a)pirenu (BaP). Szczegółowe informacje dotyczące liczby i lokalizacji stacji monitoringu zanieczyszczenia powietrza są zawarte w wojewódzkich programach monitoringu środowiska.

Na podstawie danych z wojewódzkich systemów oceny jakości powietrza odrębnie dla każdej substancji dokonuje się klasyfikacji stref, w których poziom:

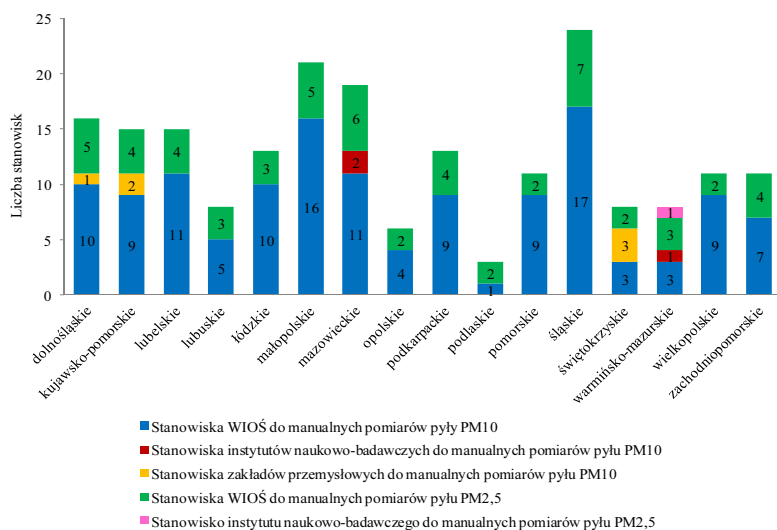
- przekracza poziom dopuszczalny powiększony o margines tolerancji,
- mieści się między poziomem dopuszczalnym a poziomem dopuszczalnym powiększonym o margines tolerancji,
- nie przekracza poziomu dopuszczalnego,
- przekracza poziom docelowy,
- nie przekracza poziomu docelowego,
- przekracza poziom celu długoterminowego (dla ozonu),
- nie przekracza poziomu celu długoterminowego.

Jednocześnie w strefach są wskazywane obszary wymagające podjęcia działań w celu uzyskania i utrzymania wymaganego poziomu jakości powietrza. Funkcjonowanie systemu oceny jakości powietrza określa Program Państwowego Monitoringu na lata 2010-2012.

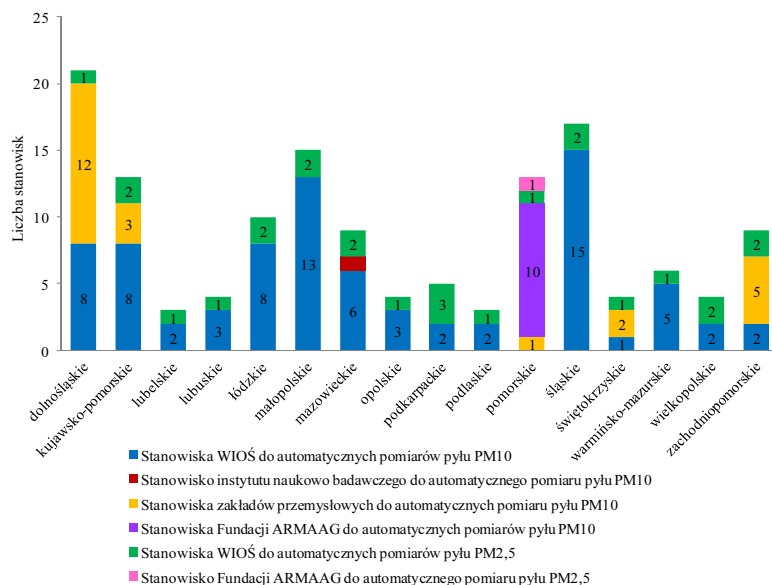
Przynajmniej raz na 5 lat, wojewódzcy inspektorzy ochrony środowiska dokonują oceny wszystkich normowanych zanieczyszczeń, której celem jest ustalenie sposobu ocen prowadzonych corocznie. Ocena ta jest nazywana „oceną pięcioletnią” lub „oceną wstępną”, jeżeli jest wykonywana dla danego zanieczyszczenia po raz pierwszy. Jest ona podstawą do zmian w wojewódzkich sieciach pomiarów jakości powietrza. Ostatnia ocena pięcioletnia dla wszystkich ocenianych zanieczyszczeń, z wyjątkiem pyłu PM2,5 została wykonana w roku 2010. Ocena wstępna dla pyłu PM2,5 została wykonana w roku 2009.

System pomiarów i ocen jakości powietrza jest zgodny z wymogami dyrektywy 2008/50/WE oraz dyrektywy 2004/107/WE. System ten jest oparty głównie na pomiarach prowadzonych w stałych punktach pomiarowych przez wojewódzkie inspektoraty ochrony środowiska. Do systemu należą również wybrane stanowiska

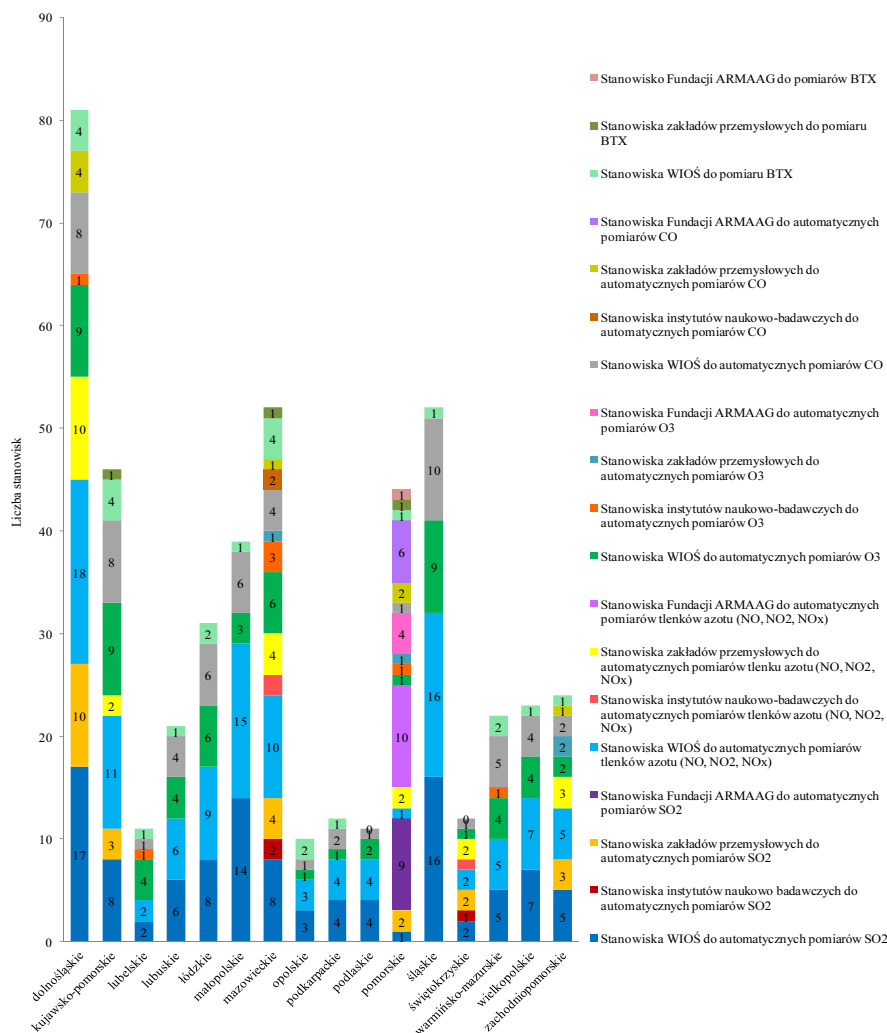
instytutów naukowo-badawczych, zakładów przemysłowych oraz stanowiska fundacji ARMAAG (Fundacja Agencja Monitoringu Regionalnego Atmosfery Aglomeracji Gdańskiej).



Rys. 1. Zestawienie liczby stanowisk pomiarów manualnych, z których dane wykorzystano w ocenie zanieczyszczenia powietrza pyłem PM10 i PM2,5 za 2010 rok, w podziale na województwa z uwzględnieniem właścicieli tych stanowisk (źródło danych GIOŚ/PMŚ)



Rys. 2. Zestawienie liczby stanowisk pomiarów automatycznych, z których dane wykorzystano w ocenie zanieczyszczenia powietrza pyłem PM10 i PM2,5 za 2010 rok, w podziale na województwa z uwzględnieniem właścicieli tych stanowisk (źródło danych GIOŚ/PMŚ)



Rys. 3. Zestawienie liczby stanowisk automatycznych pomiarów zanieczyszczeń gazowych, z których dane wykorzystano w ocenie zanieczyszczenia powietrza za 2010 rok, w podziale na zanieczyszczenia, województwa i właścicieli stanowisk (źródło danych GIOŚ/PMŚ)

W 2010 roku w ocenie zostały uwzględnione wyniki z 621 stanowisk automatycznych (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, BTX, PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>) i 202 stanowisk manualnych (PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>) oraz z 1037 stanowisk pasywnych (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), przy czym ok. 79% pomiarów automatycznych, 95% pomiarów manualnych pyłu (PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>) oraz wszystkie pomiary pasywne zostały wykonane przez wojewódzkie inspektoraty ochrony środowiska (WIOŚ). Szczegółowe informacje dotyczące sieci pomiarowej w podziale na województwa, mierzone zanieczyszczenia i właścicieli przedstawiono na rys. 1-3.

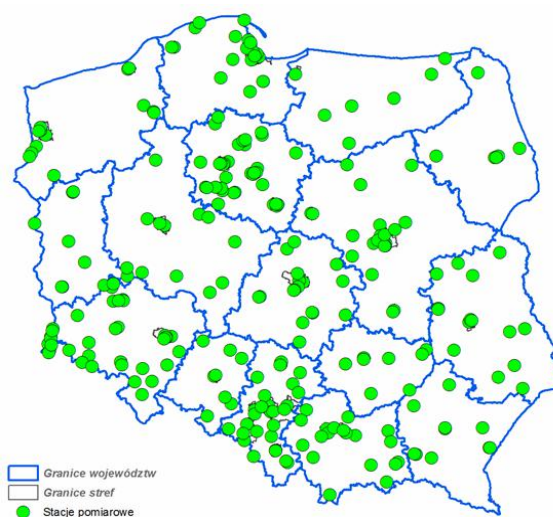
Na potrzeby rocznych ocen jakości powietrza, oprócz wymienionych pomiarów, są prowadzone również analizy składu pyłu PM<sub>10</sub> pod kątem metali ciężkich

(As, Cd, Pb, Ni) oraz benzo(a)pirenu. Są one wykonywane niemal wyłącznie przez WIOŚ. Analizy te w 2010 roku były prowadzone w odniesieniu do:

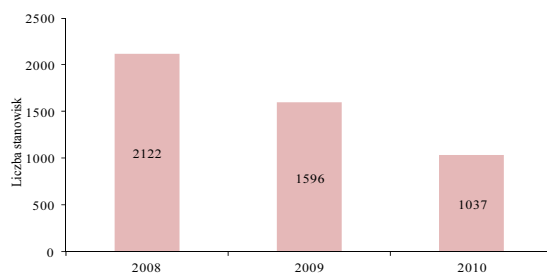
- arsenu na 89 stanowiskach,
- kadmu, niklu i ołowiu na 95 stanowiskach,
- benzo(a)pirenu na 115 stanowiskach.

Dodatkowo, na wybranych 16 stacjach tła miejskiego WIOŚ prowadzą monitoring 6 wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, tj. benzo(a)antracenu, benzo(b)fluorantenu, benzo(j)fluorantenu, benzo(k)fluorantenu, indeno(1,2,3-cd)pirenu i dibenzo(a,h)antracenu w pyłe PM10.

Gęstość sieci pomiarowej jest ściśle związana ze stężeniami zanieczyszczeń w powietrzu, dlatego też w województwach południowej i środkowej Polski liczba stanowisk dla poszczególnych zanieczyszczeń jest znacząco większa aniżeli w województwach północnych.



Rys. 4. Lokalizacja stacji pomiarowych w Polsce, z których wyniki za 2010 rok wykorzystano w ocenie jakości powietrza (źródło danych GIOŚ/PMŚ) [Mitosek i in. 2011a]



Rys. 5. Zmiana liczby stanowisk pasywnych pomiarów zanieczyszczeń gazowych w latach 2008-2010 (źródło danych GIOŚ/PMŚ)



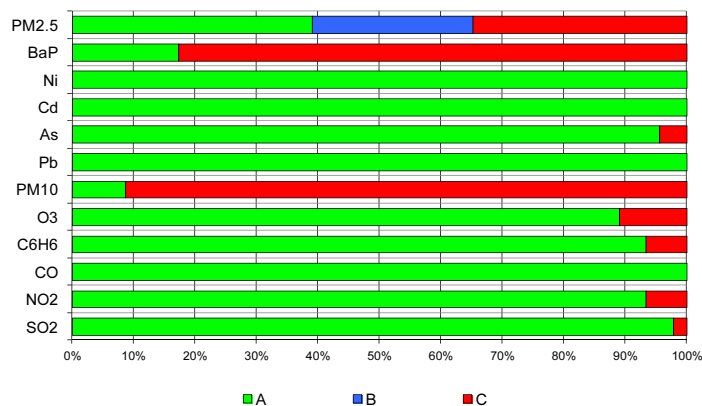
W ostatnich latach systematycznie maleje liczba stanowisk pasywnych; pozostało 1037 stanowisk z 2122 w roku 2008 (rys. 5). Jest to spowodowane obserwowanym od lat relatywnie niskimi stężeniami zwłaszcza dwutlenku siarki, stosowaniem referencyjnych metod pomiarowych oraz w niektórych województwach wspomaganie oceny metodami modelowania matematycznego.

Jednocześnie ze względu na konieczność wdrożenia od 2010 roku pomiarów pyłu PM<sub>2,5</sub> znacząco wzrosła liczba stanowisk pomiaru pyłu PM<sub>2,5</sub>. W roku 2009 utworzono ok. 20 nowych stanowisk automatycznych i ok. 50 stanowisk manualnych pomiarów pyłu PM<sub>2,5</sub>.

Podstawą rocznej oceny za 2010 rok w odniesieniu niemal do wszystkich stref i wszystkich zanieczyszczeń był pomiar, w niektórych województwach (m.in. mazowieckim, zachodniopomorskim) ocenę wspomaganą metodami modelowania matematycznego, w sporadycznych przypadkach podstawą oceny, a następnie klasyfikacji stref była metoda obiektywnego szacowania.

Zgodnie z zasadami ocen rocznych, o klasie strefy decydują wyniki oceny na obszarach o potencjalnie najwyższych stężeniach. Zaliczenie strefy do klasy C (czyli takiej, w której jest przekroczona wartość kryterialna) nie oznacza zatem, że określone wymagania co do jakości powietrza nie są spełnione na terenie całej strefy. Oznacza natomiast potrzebę podjęcia działań na rzecz poprawy jakości powietrza w odniesieniu do wybranych obszarów w strefie (zwykle o ograniczonym zasięgu) i dla określonych zanieczyszczeń.

Coroczne oceny wskazują na utrzymujący się problem zanieczyszczenia powietrza pyłem drobnym PM<sub>10</sub> i zawartym w nim benzo(a)pirenem (rys. 6). Potwierdzają to również wyniki oceny jakości powietrza pod kątem pyłu PM<sub>2,5</sub> (rok 2010 był pierwszym rokiem, dla którego wykonano ocenę jakości powietrza pod kątem pyłu PM<sub>2,5</sub>). Na wielu obszarach południowej i centralnej Polski występują przekroczenia poziomu docelowego dla benzo(a)pirenu oraz poziomów dopuszczalnych dla pyłu PM<sub>10</sub>, zwłaszcza normy dobowej.



Rys. 6. Udział stref zaliczonych do określonych klas w łącznej liczbie stref w Polsce w 2010 r. dla poszczególnych zanieczyszczeń (klasy wynikowe, ochrona zdrowia) – wynik oceny wg jednolitych kryteriów UE (źródło danych GIOŚ/PMŚ) [Mitosek i in. 2011b]

Oprócz pomiarów dla potrzeb rocznych ocen jakości powietrza, w ramach systemu Państwowego Monitoringu Środowiska są również realizowane pomiary stanu zanieczyszczenia powietrza pyłem PM<sub>2,5</sub>. Obowiązek wykonywania tych pomiarów wynika z art. 15 ust. 3 dyrektywy 2008/50/WE, a ich celem jest wyznaczenie wskaźnika średniego narażenia i na tej podstawie ustalenie krajowego celu redukcji narażenia na pył PM<sub>2,5</sub>.

W latach 2010-2020 na 32 stacjach monitoringu, zlokalizowanych na obszarach tła miejskiego w aglomeracjach i miastach powyżej 100 000 mieszkańców, na terenie całego kraju są i będą prowadzone pomiary pyłu PM<sub>2,5</sub> dla potrzeb wyznaczenia, a następnie monitorowania wskaźnika średniego narażenia. Pomiary te są prowadzone przez WIOŚ. Na podstawie wyników pomiarów od 2011 roku jest obliczana wartość wskaźnika średniego narażenia na pył PM<sub>2,5</sub>. Dla roku 2010 średnia roczna wartość tego wskaźnika wyniosła 28 µg/m<sup>3</sup>. Jest ona znacznie większa od celu do osiągnięcia w roku 2015 – 20 µg/m<sup>3</sup> (wartość pułapu stężenia ekspozycji) i potwierdza poważne problemy z wysokimi stężeniami pyłu drobnego w dużych miastach i aglomeracjach, zwłaszcza w południowej części kraju.

W ramach Państwowego Monitoringu Środowiska są również prowadzone badania jakości powietrza na stacjach tła regionalnego. Badania te obejmują pomiary stanu zanieczyszczenia powietrza metalami ciężkimi i WWA, analizy stanu zanieczyszczenia powietrza pyłem PM<sub>2,5</sub> z uwzględnieniem jego składu chemicznego na stacjach monitoringu tła regionalnego (stacje w Zielonce – woj. kujawsko-pomorskie, Osieczowie – woj. dolnośląskie i Puszczy Boreckiej – woj. warmińsko-mazurskie), pomiary stanu zanieczyszczenia powietrza rtęcią w stanie gazowym (stacja w Zielonce, Osieczowie, Puszczy Boreckiej, Złotym Potoku – woj. śląskie i Granicy – woj. mazowieckie), monitoring prekursorów ozonu (stacja w Zielonce) oraz monitoring tła zanieczyszczenia atmosfery na stacjach Łeba, Jarczew, Śnieżka, Puszcza Borecka wg programów EMEP, GAW/WMO i COMBINE/HELCOM (zadanie to w całości realizują instytuty naukowo-badawcze).

Wyniki pomiarów z analizatorów automatycznych w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska są na bieżąco udostępniane na stronach internetowych WIOŚ. Są również przesyłane do serwisu Ozoneweb Europejskiej Agencji Środowiska oraz projektu MACC, a także wykorzystywane do wytwarzania informacji niezbędnej do powiadamiania społeczeństwa o ekstremalnie wysokich stężeniach zanieczyszczeń (dla których są określone w prawie poziomy alarmowe) oraz do podejmowania działań mających na celu przeciwdziałanie tym przekroczeniom.

Ze względu na znaczenie danych dotyczących jakości powietrza wytwarzanych w ramach PMŚ, niezwykle istotne jest zapewnienie jakości zarówno pomiarom, jak i wytwarzanym na ich podstawie ocenom. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, zgodnie z art. 90 ust. 6 ustawy Prawo ochrony środowiska koordynuje działania w tym zakresie przez wskazywanie procedur jakości, w tym zapewnienie spójności pomiarowej przy udziale Laboratorium Referencyjnego i Wzorcującego.

Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska zapewniają odpowiednią jakość pomiarów w automatycznych sieciach monitoringu powietrza poprzez zdalną,

automatyczną kalibrację analizatorów na stacjach monitoringu, regularne przeglądy sprzętu zgodnie z instrukcjami producentów i dobrymi praktykami oraz dokumentowanie wszystkich tych działań.

Prowadzone są regularne sprawdzenia, kalibracje i interkalibracje analizatorów automatycznych. System oparty jest na łańcuchu spójności pomiarowej między wzorcami referencyjnymi dla zanieczyszczeń gazowych a wzorcami roboczymi wykorzystywanymi przez sieci pomiarowe do kalibracji sprzętu pomiarowego.

W celu zapewnienia jakości pomiarów manualnym pyłu PM10 i PM2,5, w roku 2011 przeprowadzono terenowe badania porównawcze łącznie ok. 40 pyłomierzy różnych typów.

### **Literatura**

Dyrektywa 2004/107/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 15 grudnia 2004 roku w sprawie arsenu, kadmu, rtęci, niklu i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w otaczającym powietrzu (Dz. Urz. UE L 23 z 26.01.2005)

Dyrektywa 2008/50/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 maja 2008 roku w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy (Dz. Urz. UE L 152 z 11.06.2008)

Mitosek G., Kobus D., Iwanek J., 2011a, Sprawozdanie przejściowe z 1 etapu pracy „Przetworzenie danych i wykonanie zbiorczych ocen jakości powietrza w Polsce na podstawie badań Państwowego Monitoringu Środowiska, wg prawa krajowego i wymagań sprawozdawczości europejskiej w 2011 r. Praca wykonana na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska przez Instytut Ochrony Środowiska – PIB, Warszawa

Mitosek G., Kobus D., Iwanek J., 2011b, Ocena jakości powietrza w strefach w Polsce za rok 2010. Praca wykonana na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska przez Instytut Ochrony Środowiska – PIB, Warszawa

PMŚ, 2010, Program Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2010-2012. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa

Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska. Dz. U. 2008 Nr 25 poz. 150 (tekst jednolity) z późn. zm:

## Wybrane elementy oceny jakości powietrza

*Ewa Krajny, Leszek Ośródk, Krzysztof Klejnowski,  
Wioletta Rogula-Kozłowska*

Jak wspomniano w rozdziale poprzednim, za przeprowadzenie oceny jakości powietrza w Polsce w rozumieniu zapisów ustawy Prawo ochrony środowiska (POŚ) odpowiadają wojewódzcy inspektorzy ochrony środowiska, a koordynatorem ich działań pozostaje Główny Inspektor Ochrony Środowiska. Ocena taka zawiera kompleksową informację o jakości powietrza w Polsce w stosunku do wszystkich badanych substancji zanieczyszczających i w odniesieniu do obowiązujących norm. W niniejszym rozdziale, dotyczącym tylko wybranych elementów tej oceny, przedstawiono propozycje upowszechniania wiedzy o tym aspekcie środowiska człowieka oraz wskazano aktualnie największe zagrożenia w tym zakresie.

### **1. Indeks jakości powietrza jako wskaźnik oceny czystości powietrza**

Jakkolwiek głównym przedmiotem niniejszej pracy są zanieczyszczenia pyłowe, to dla pokazania ich roli w kształtowaniu się jakości powietrza w Polsce przedstawiono je w kontekście innych substancji zanieczyszczających. Wykorzystano do tego tzw. wskaźnik (indeks) jakości powietrza AQI (*Air Quality Index*), który stanowi alternatywę do wykorzystywania wartości bezwzględnych stężeń zanieczyszczeń. Ta szeroko stosowana w świecie metoda ma coraz większe znaczenie i w Polsce. Jej powodzenie wynika między innymi z ograniczonej wiedzy społeczeństwa na temat zanieczyszczeń powietrza i przyzwyczajenia ludzi do posługiwania się piktogramami w komunikacji społecznej. Intuicyjnie kolor zielony, żółty czy czerwony są postrzegane jako sygnalizacja pozytywnego lub negatywnego stanu. Fakt ten wykorzystano przypisując wartościom bezwzględnych indeksów różne kolory. Zwykle AQI wylicza się jednocześnie dla kilku zanieczyszczeń. Stan jakości powietrza charakteryzuje ten spośród cząstkowych AQI, który przyjął największą (najbardziej niekorzystną) wartość.

Na świecie funkcjonuje wiele indeksów dotyczących jakości powietrza, ich tworzenie rozpoczęto wraz z utworzeniem pierwszych sieci automatycznego monitoringu. Obecnie dąży się do ujednoczenia podejścia w obszarach posługujących się jednolitymi standardami.

Najszerzej znany jest amerykański AQI EPA – z uwagi na powszechność stosowania i dostępność jednolitej prognozy dla całego obszaru USA. W krajach UE w ramach projektu CITEAIR opracowano europejski wskaźnik AQI dostosowany do obowiązującego systemu standardów jakości powietrza.

#### *Amerykański wskaźnik jakości powietrza – AQI EPA*

Pierwszy indeks jakości, który przypomina formułą indeksy obecnie stosowane w Europie i na świecie, powstał w USA w 1976 r. i do dziś oznaczany jest akronimem PSI (*Pollutant Standards Index*) albo AQI. Ustalenie możliwie prostej, a jednocześnie uniwersalnej formuły obliczeniowej było poprzedzone badaniami w 55 zurbanizowanych obszarach USA i Kanady, w których wyniku wydzielono 14 głównych substancji zanieczyszczających powietrze, wymagających uwzględnienia przy indeksowaniu jakości powietrza oraz aż 55 substancji o mniejszym znaczeniu. Ostatecznie, ze względu na czytelność indeksu dla opinii publicznej, ograniczono liczbę zanieczyszczeń poddawanych indeksowaniu do tych, dla których w USA ustalono standardy jakości powietrza NAAQS [2006 i późniejsze wersje] (*National Ambient Air Quality Standard*). Wartości indeksu odniesiono do normatywnych wg NAAQS poziomów tych zanieczyszczeń oraz takich poziomów zanieczyszczeń, które stwarzają zagrożenie dla zdrowia populacji SHL (*Significant Harm Levels*). Tak więc w pierwszej wersji AQI objął następujące zanieczyszczenia: ozon O<sub>3</sub>, tlenek węgla CO, dwutlenek siarki SO<sub>2</sub>, dwutlenek azotu NO<sub>2</sub> oraz pył zawieszony PM<sub>10</sub>. W 1979 r. dokonano zmiany w zakresie indeksowania stężenia O<sub>3</sub>, a w 1997 r. – kolejnej zmiany, wynikającej z wprowadzenia nowego czasu uśredniania dla standardów O<sub>3</sub> oraz PM<sub>10</sub> i nowej normy dla PM<sub>2,5</sub>.

Wskaźnik AQI według Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (*US Environmental Protection Agency – EPA*) w obecnie obowiązującym kształcie obejmuje 7 kategorii (klas jakości powietrza) w zakresie wartości: 0-50 (dobra jakość

Tab. 1. Sposób indeksowania, czasy uśredniania i przedziały stężeń zanieczyszczeń dla AQI EPA

Wskaźnik AQI EPA		Zanieczyszczenie (µg/m <sup>3</sup> )						
		O <sub>3</sub>		PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>
Kategoria	Klasa	8 godz. średnia krocząca	1 godz.	24 godz.		8 godz. średnia krocząca	24 godz.	1 godz.
0-50	1 dobra	0-128	-	0,0-15,4	0-54	0-5179	0-91	**
51-100	2 umiarkowana	129-168	-	15,5-40,4	55-154	5180-10999	92-384	**
101-150	3 niezdrowa dla osób wrażliwych	169-208	249-328	40,5-65,4	155-254	11000-14491	385-597	**
151-200	4 niezdrowa	209-248	329-408	65,5-150,4	255-354	14492-17983	598-810	**
201-300	5 bardzo niezdrowa	249-746	409-807	150,5-250,4	355-424	17984-35443	811-1609	1243-2381
301-400	6 niebezpieczna	*	808-1006	250,5-350,4	425-504	35444-47083	1610-2142	2382-3146
401-500		*	1007-1205	350,5-500,4	505-604	47084-58666	2143-2674	3147-3903

\* W przypadku, gdy 8-godzinne stężenie O<sub>3</sub> przekracza 746 µg/m<sup>3</sup>, indeks AQI wylicza się na podstawie stężenia 1-godzinnego

\*\* Dla NO<sub>2</sub> nie określono normy NAAQS, indeks AQI wylicza się wyłącznie dla wartości AQI > 200

powietrza), 51-100 (umiarkowana), 101-150 (niezdrowa dla osób wrażliwych), 151-200 (niezdrowa), 201-300 (bardzo niezdrowa) oraz 301-400 i 401-500 (2 kategorie niebezpieczne). Dla poprawy wizualizacji indeksu AQI umieszczanego na stronach internetowych, w mediach i publikacjach, każdej kategorii przypisano odpowiedni kolor.

W tabeli 1 przedstawiono sposób indeksowania AQI według EPA dla poszczególnych zanieczyszczeń i czasów uśredniania.

#### Europejski wskaźnik jakości powietrza – CAQI

Jakość powietrza w krajach Unii Europejskiej klasyfikuje się stosując tzw. wspólny indeks jakości powietrza CAQI (*Common Air Quality Index*). Jego formuła została określona na potrzeby porównywania jakości powietrza w różnych miastach Europy. Indeks ten posługuje się Europejska Agencja Środowiska [EEA 2010] w ramach systemu udostępniania informacji o jakości powietrza Eye On Earth.

Wspólny wskaźnik jakości powietrza CAQI jest wyliczany jednocześnie dla NO<sub>2</sub>, PM10, O<sub>3</sub>, CO, SO<sub>2</sub>. W tabeli 2 podano odpowiadające poszczególnym klasom indeksu CAQI zakresy stężeń zanieczyszczeń. Klasy 1-3 dotyczą powietrza o zadowalającej jakości, tj. o zanieczyszczeniu niestwarzającym zagrożenia dla zdrowia ludzi. Klasy 4 i 5 oznaczają powietrze złej jakości – o poziomie zanieczyszczenia stwarzającym zagrożenie zdrowotne szczególnie dla grup wrażliwych (klasa 4) lub całej populacji (klasa 5). Wskaźnik o wartości przekraczającej 100, na stronach internetowych Airqualitynow jest raportowany w postaci „> 100”.

Tab. 2. Sposób indeksowania, czasy uśredniania i przedziały stężeń zanieczyszczeń dla CAQI

Wskaźnik CAQI		Typ stacji													
		tło miejskie					komunikacyjna								
		Zanieczyszczenie (µg/m <sup>3</sup> )													
		obligatoryjne				fakultatywne				obligatoryjne		fakultatywne			
Kategoria	Klasa	NO <sub>2</sub>		PM10		O <sub>3</sub>		PM2,5		CO		SO <sub>2</sub>			
		1 godz.	1 godz.	24 godz.	1 godz.	1 godz.	24 godz.	8 godz. średnia krocząca	1 godz.	1 godz.	1 godz.	24 godz.	1 godz.	24 godz.	8 godz. średnia krocząca
0-25	1 bardzo niski	0-50	0-25	0-15	0-60	0-15	0-10	0-5000	0-50	0-50	0-25	0-15	0-15	0-10	0-5000
25-50	2 niski	51-100	26-50	16-30	61-120	16-30	11-20	5001-7500	51-100	51-100	26-50	16-30	16-30	11-20	5001-7500
50-75	3 średni	101-200	51-90	31-50	121-180	31-55	21-30	7501-10000	101-300	101-200	51-90	31-50	31-55	21-30	7501-10000
75-100	4 wysoki	201-400	91-180	51-100	181-240	56-110	31-60	10001-20000	301-500	201-400	91-180	51-100	56-110	31-60	10001-20000
> 100	5 bardzo wysoki	> 400	>180	>100	> 240	>110	> 60	> 20000	> 500	> 400	>180	>100	>110	> 60	> 20000

### Indeks pyłowy dla województwa śląskiego i małopolskiego

Zanieczyszczeniem dominującym w województwie śląskim i małopolskim jest pył zawieszony i to on w sezonie zimowym w 100% sytuacji podwyższonych stężeń zanieczyszczeń decyduje o wskaźniku jakości powietrza. Dla uproszczenia procedury w działaniach operacyjnych zaproponowano więc wyznaczanie wskaźnika jakości na podstawie tylko jednej substancji PM, czyli indeksu pyłu zawieszonego (PMI). Przyporządkowanie średnich dobowych stężeń pyłu PM10 do 5 klas odbywa się przez równy podział zakresu od 0–200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , przy czym górny zakres klasy 1 odpowiada poziomowi dobowego stężenia dopuszczalnego, dolny zakres klasy 5 odpowiada wartości progowej informowania społeczeństwa o ryzyku wystąpienia przez trzy kolejne doby niekorzystnych skutków zdrowotnych (poziom alarmowy) [Rozporządzenie ... 2008]. Kolejnym etapem będzie uwzględnienie w indeksie pyłowym również drobnych frakcji  $\text{PM} \leq 2,5$ .

Zaletą tego wskaźnika wydaje się równy podział na klasy, których granice wyznaczają wartości prawnie normowane, jednak – tak jak w przypadku wielu innych funkcjonujących wskaźników – brak jest tu udowodnionych odniesień do skutków zdrowotnych.

Tab. 3. Sposób indeksowania, czas uśredniania i przedział stężeń PM10 dla PMI

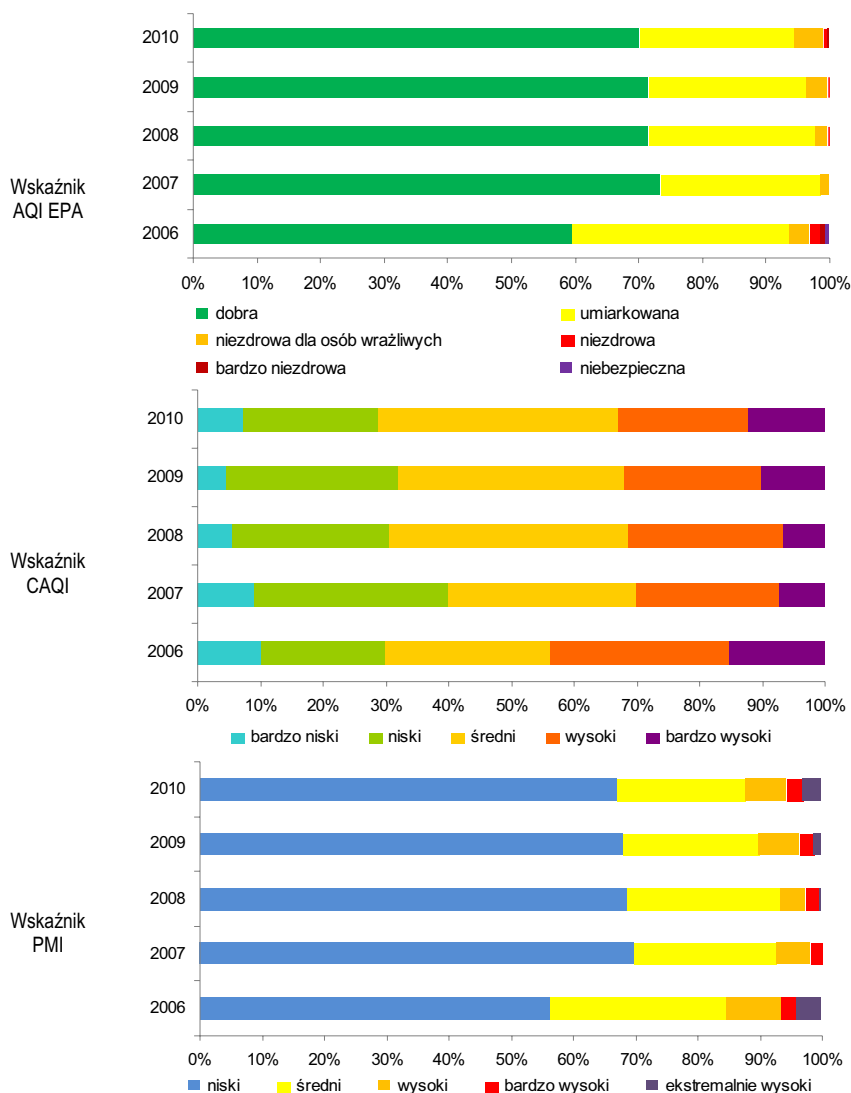
Wskaźnik PMI - Klasa	PM10
	24 godz. ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1 niski (w normie)	$\leq 50$
2 średni	51-100
3 wysoki	101-150
4 bardzo wysoki	151-200
5 ekstremalnie wysoki	$> 200$

Najnowszy funkcjonujący operacyjnie w świecie, tzw. zdrowotny indeks jakości powietrza AQHI (*Air Quality Health Index*), został opracowany przez służbę zdrowia i agencję środowiska w Kanadzie [Abelsohn, Stieb 2011]. Wskaźnik AQHI określa względne ryzyko zdrowotne opracowane na podstawie danych epidemiologicznych i przy uwzględnieniu takich zanieczyszczeń powietrza jak: ozon przyziemny,  $\text{PM}_{2,5}$  i  $\text{PM}_{10}$  oraz  $\text{NO}_2$ .

Na rysunku 1 przedstawiono porównanie wskaźników jakości powietrza wyznaczonych ze względu na zanieczyszczenia  $\text{PM}_{10}$  dla stacji w Zabrze.

Wyniki porównań wskazują, że choć wskaźnik AQI EPA był tak konstruowany, aby uwzględniać skutki zdrowotne zanieczyszczeń powietrza, to biorąc pod uwagę dostosowanie do obowiązujących w Polsce i Europie poziomów odniesienia [Dyrektywa 2008/50/WE], bardziej odpowiedni jest wskaźnik CAQI. Jego wadą jest jednak brak różnicowania sytuacji aerosanitarnych o stężeniach dobowych pyłu  $\text{PM}_{10} > 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , które stanowią w Polsce dużą część sytuacji z wysokimi stężeniami PM. Takie sytuacje (rys. 2) są klasyfikowane jako „wskaźnik bardzo wysoki” i nie pozwalają na wariantowanie jakości powietrza w obszarach zagrożo-



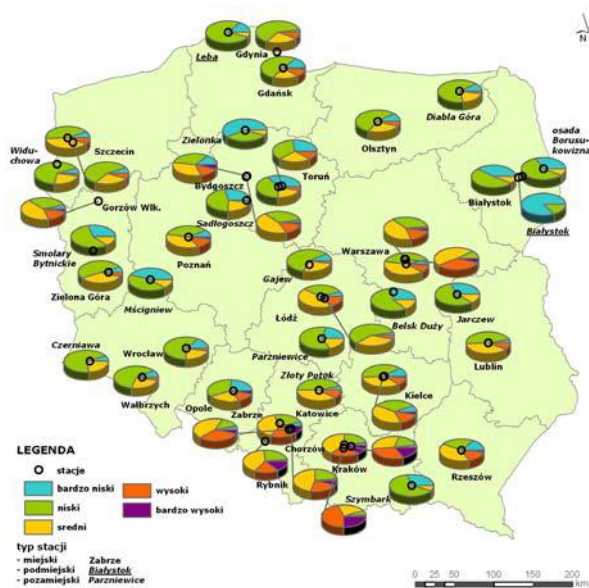


Rys. 1. Porównanie różnych wskaźników jakości powietrza wyznaczanych ze względu na PM10 dla Zabrze w latach 2006-2010

nych szczególnie wysokimi stężeniami (np. Aglomeracji Górnośląskiej<sup>4</sup> czy Krakowskiej). Do tego celu bardziej odpowiedni wydaje się zaproponowany przez IMGW-PIB – zbliżony, co do idei do wskaźnika CAQI – wskaźnik pyłowy PMI

<sup>4</sup> W niniejszej publikacji Aglomeracja Górnośląska dotyczy obszaru stosowanego do oceny jakości powietrza zgodnie z ustawą POŚ [Ustawa ...2001, art. 89; art. 91, ust. 1], zdefiniowaną jako strefa (art. 87, pkt 2). Zgodnie z rozporządzeniem [z dnia 6 marca 2008] w sprawie stref, w których dokonuje się oceny jakości powietrza w skład Aglomeracji Górnośląskiej wchodzi 14 następujących miast: Bytom, Chorzów, Dąbrowa Górnicza, Gliwice, Jaworzno, Katowice, Mysłowice, Piekary Śląskie, Ruda Śląska, Siemianowice Śląskie, Sosnowiec, Świętochłowice, Tychy, Zabrze.

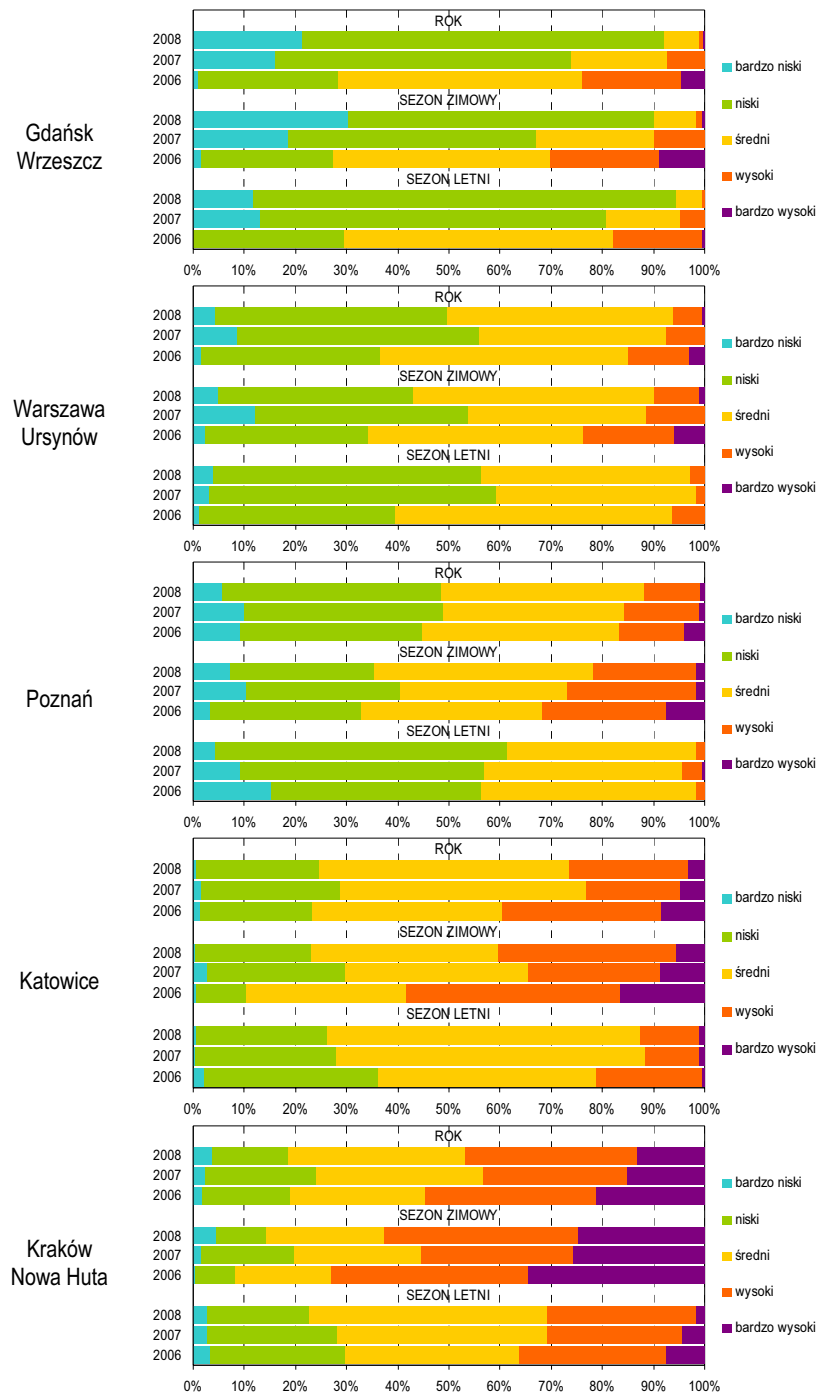
dla województwa śląskiego i małopolskiego, który wyodrębnia kolejne klasy dobowego stężenia pyłu PM10 wyższego od  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dzięki temu możliwe jest wydzielenie sytuacji sanitarnych powietrza, podczas których stężenia zanieczyszczeń wielokrotnie przekraczają normę dobową. Należy jednak raz jeszcze podkreślić, że stosowanie tego wskaźnika ma na celu klasyfikację stanu obecnego lub przyszłego (prognoza) jakości powietrza i nie ma odniesienia do spodziewanych skutków zdrowotnych. Wskaźnik CAQI może natomiast być stosowany do kompleksowej oceny jakości powietrza na obszarach o zróżnicowanej jakości powietrza.



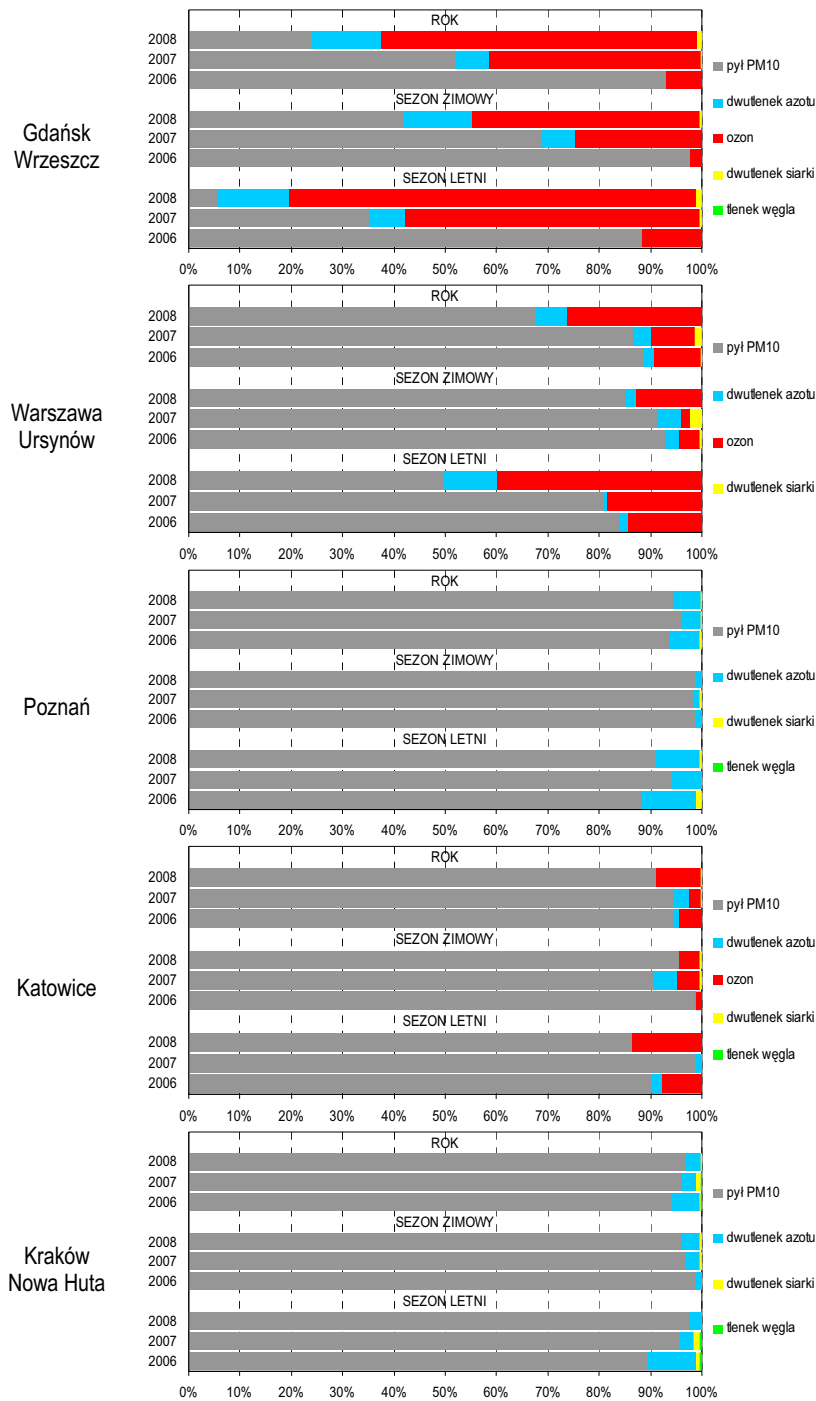
Rys. 2. Częstość występowania wspólnego indeksu jakości powietrza CAQI w latach 2006-2008 na wybranych stacjach monitoringu jakości powietrza w Polsce (źródło: dane GIOŚ/PMŚ, mapa: [Wypych i Ostapowicz 2010])

Klasyfikację stanu jakości powietrza na wybranych stacjach PMŚ w latach 2006-2008 na podstawie częstości występowania wskaźnika CAQI przedstawiono na rys. 3 i 4.

Zastosowanie 5-stopniowego wskaźnika wspólnego CAQI potwierdziło zróżnicowanie klas jakości powietrza w zależności od warunków lokalnych. W rejonach, gdzie zanieczyszczenie powietrza pyłem PM10 jest największe, tu reprezentowanych przez stacje w Katowicach i Krakowie i Poznaniu, a także w mniejszym stopniu w Warszawie i Gdańsku, o wartości wskaźnika decyduje prawie zawsze stężenie pyłu. Dzieje się tak niezależnie od zmiennych w czasie warunków meteorologicznych. Na stacji w Gdańsku pył ma znaczenie decydujące w sezonach zimowych, a latem zanieczyszczeniem determinującym wskaźnik jakości powietrza jest ozon. Z kolei częstość występowania klas jakości powietrza w poszczególnych latach jest odzwierciedleniem zmienności warunków meteorologicznych, które decydują o stężeniach zanieczyszczeń.



Rys. 3. Wyniki analizy stanu zanieczyszczenia powietrza w latach 2006-2008 pod kątem wyznaczenia wspólnego indeksu jakości powietrza CAQI na stacjach pomiarowych PMŚ w Gdańsku, Warszawie, Poznaniu, Katowicach i Krakowie



Rys. 4. Wyniki analizy stanu zanieczyszczenia powietrza w latach 2006-2008 pod kątem wyznaczenia dominującej substancji decydującej o CAQI na stacjach pomiarowych PMS w Gdańsku, Warszawie, Poznaniu, Katowicach i Krakowie

Z ustawowego wymogu dostępu do informacji publicznej [Ustawa ... 2011] wynika konieczność dostosowania przekazu specjalistycznych danych środowiskowych do potrzeb ogółu społeczeństwa. W zakresie informacji o jakości powietrza jego wskaźnik może być doskonałym przybliżeniem przekazywania tego typu wiedzy, szczególnie dla osób nie związanych zawodowo z problematyką pogody chemicznej.

Dokonany przegląd wskaźników jakości powietrza pozwolił na porównanie zakresów ich stosowania i możliwości adaptacji do warunków Polski. Wydaje się, że dla celów porównawczych z powodzeniem można tutaj wykorzystać wskaźnik CAQI, który jednak ze względu na brak wartościowania wysokich stężeń dobowych dominującego w Polsce pyłu PM10 powinien być zmodyfikowany w przypadku jego wykorzystywania do celów prognostycznych. Istotne jest jednak dostosowanie zakresu jego przedziałów, szczególnie w odniesieniu do stężeń ponadnormatywnych, do potencjalnych skutków zdrowotnych [Ośródk i in. 2011].

Niestety, dotychczasowe prace nie rozstrzygają jednoznacznie wpływu stężeń zanieczyszczeń na bezpośrednie skutki zdrowotne [WHO 2006a, ETC/ACC 2008, Kowalska i in. 2008, Kowalska i in. 2009], a stosowane klasyfikacje zagrożeń wydają się jedynie propozycją rozwiązań.

## **2. Pył zawieszony jako główny element pogody chemicznej**

Źródła zanieczyszczenia powietrza pyłem można podzielić na naturalne i antropogeniczne. Dyrektywa 2008/50/WE definiuje w art. 2 „udział zanieczyszczeń pochodzących ze źródeł naturalnych jako emisję zanieczyszczeń, która nie jest spowodowana bezpośrednio lub pośrednio działalnością człowieka, w tym:

- zjawiska naturalne takie, jak: wybuchy wulkanów, aktywność sejsmiczna, aktywność geotermiczna, pożary nieużytków (ale nie celowe wypalanie ściernisk i łąk), gwałtowne wichury, aerozole morskie,
- resuspensja i transport w powietrzu cząstek pochodzenia naturalnego”, a także ich przenoszenie z regionów suchych (także z obszarów poza Europą), oraz pożary lasów i stepów, pustynie, morza i oceany, skały i gleby – wietrzenie i erozja, pyłki kwiatowe, zarodniki roślin, cząsteczki zwierzęce, bioaerozol (mikroorganizmy, wirusy, bakterie), pył kosmiczny.

Do głównych źródeł wynikających z działalności człowieka zalicza się:

- spalanie paliw stałych, płynnych i gazowych,
- procesy przemysłowe,
- transport samochodowy, kolejowy, morski, lotniczy,
- budownictwo,
- rolnictwo,
- przetwarzanie odpadów,
- hodowla zwierząt,
- bytowanie człowieka.

Jak wynika z raportu EEA (<http://www.eea.europa.eu/pl/themes/air/about-air-pollution>), emisja zanieczyszczeń ze źródeł antropogenicznych od początku lat 90.

ubiegłego stulecia systematycznie maleje, ale poziom zanieczyszczeń szczególnie pyłowych nie ulega większym zmianom. Przyczyną tego zjawiska, oprócz emisji regionalnej, może być m.in. narastający problem przenoszenia czynników zanieczyszczających na dalekie odległości, a także duża zmienność pogodowa. W roku 2008 średni światowy poziom PM10 w zależności od regionu wynosił od 21 do 142  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , przy średnim stężeniu 71  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  [WHO 2011a, b].

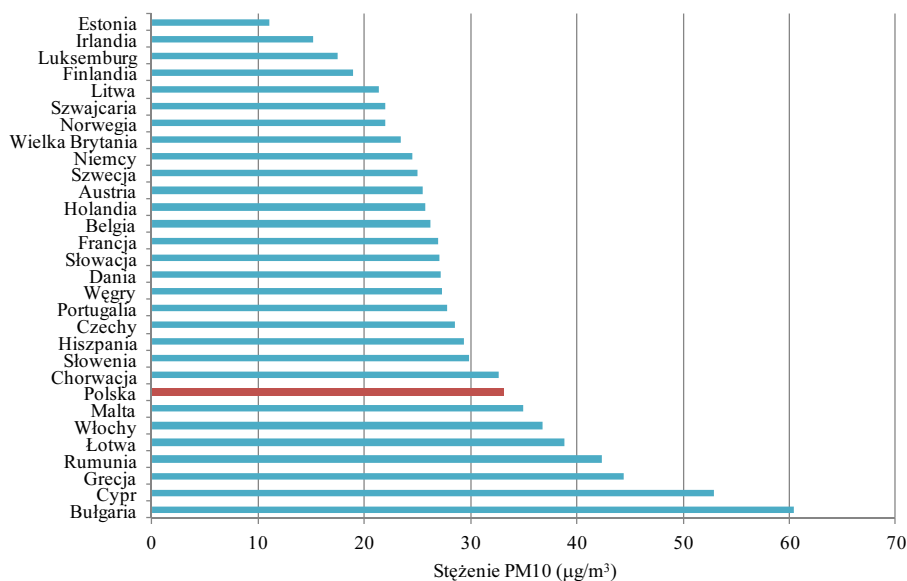
W tabeli 4 przedstawiono dopuszczalne wg różnych wytycznych stężenia PM10 i PM2,5.

Tab. 4. Dopuszczalne stężenia pyłu zawieszonego PM

Frakcja	Okres uśredniania wyników pomiarów	Dyrektywa 2008/50/WE (UE), przepisy prawa polskiego [Rozporządzenie ...2008]	US EPA* (United States Environmental Protection Agency)	WHO [2006b]
PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	24 godziny	50*	150	50
	Rok kalendarzowy	40	-	20
PM2,5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	24 godziny	-	35	25
	Rok kalendarzowy	25**	15	10

\* dopuszczalna częstość przekraczania poziomu dopuszczalnego w roku kalendarzowym wynosi 35

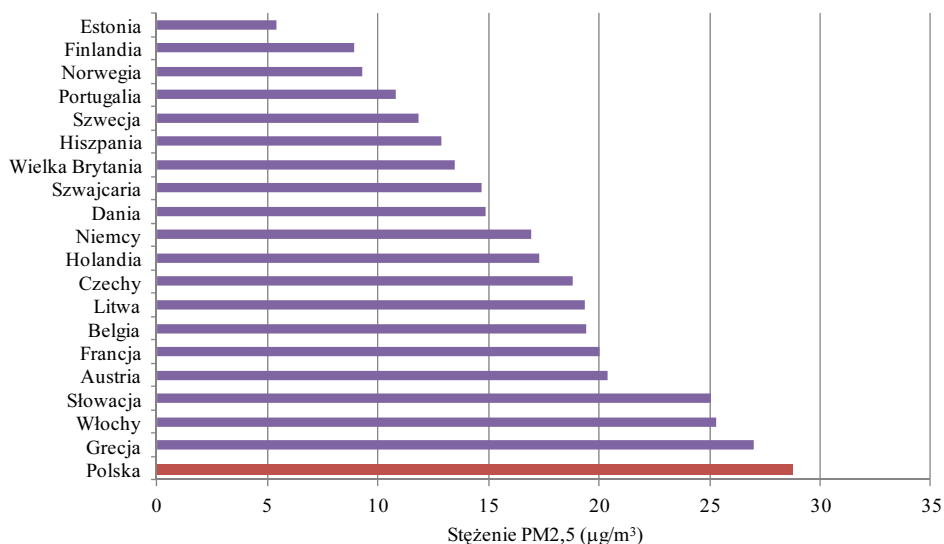
\*\* termin osiągnięcia wartości dopuszczalnej 01.01.2015 r.



Rys. 5. Średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM10 w roku 2008 w państwach UE-27 oraz Norwegii, Szwajcarii i Chorwacji [WHO 2011b]

Na podstawie załączonej do opracowania Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) bazy danych o zanieczyszczeniu pyłowym powietrza PM frakcji 10 i 2,5  $\mu\text{m}$  w świecie z lat 2003-2010, zawierającej dane o PM dla 1100 miejscowo-

ści z 91 krajów świata, stworzono ranking krajów, obszarów i miast europejskich szczególnie narażonych na wysokie stężenia zanieczyszczeń [Ostro 2004, Ostro i in. 2006].



Rys. 6. Średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM2,5 w roku 2008 w krajach UE [WHO 2011b]

W rankingu tym w 2008 roku (rys. 5 i 6) Polska na tle innych krajów Unii Europejskiej zajmowała jedno z ostatnich miejsc ze względu na średnie roczne stężenie PM10 (33,0 µg/m³) i ostatnie ze względu na stężenie PM2,5 (28,7 µg/m³).

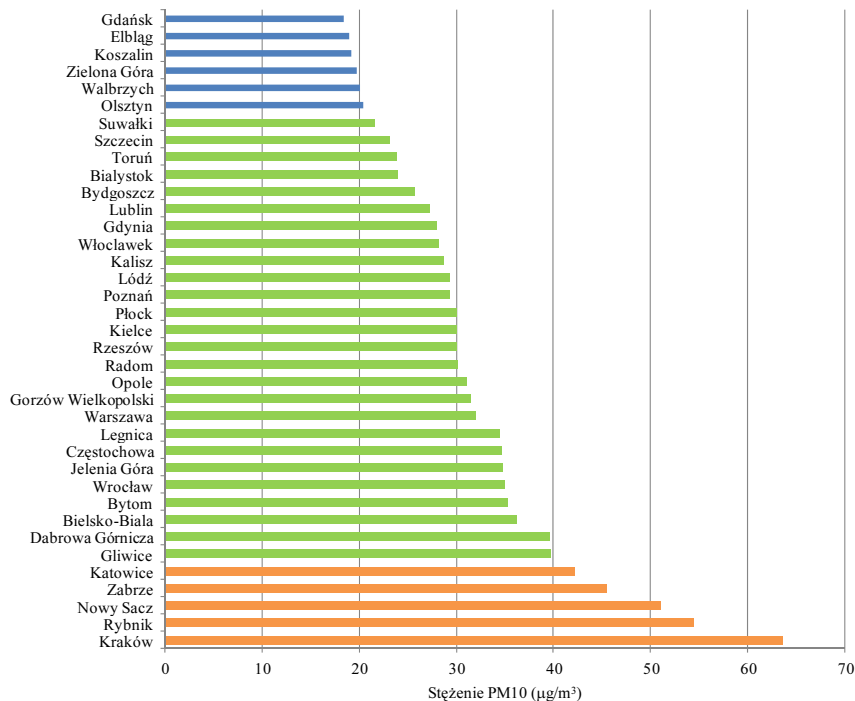
Tab. 5. Średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM10 powyżej 40 µg/m³ w roku 2008 na stacjach monitoringu jakości powietrza w UE [WHO 2011b]

Lp.	Państwo	Miejscowość	Stężenie PM10 (µg/m³)	Lp.	Państwo	Miejscowość	Stężenie PM10 (µg/m³)
1.	Bułgaria	Plovdiv	70	15.	Hiszpania	Zaragoza	45
2.	Bułgaria	Sofia	68	16.	Hiszpania	Sevilla	45
3.	Polska	Kraków	64	17.	Włochy	Milano	44
4.	Bułgaria	Pleven	57	18.	Grecja	Patra	44
5.	Grecja	Thessaloniki	56	19.	Włochy	Napoli	44
6.	Polska	Rybnik	54	20.	Włochy	Padova	43
7.	Rumunia	Iasi	54	21.	Grecja	Larissa	43
8.	Cypr	Nicosia	53	22.	Malta	Msida	43
9.	Polska	Nowy Sącz	51	23.	Grecja	Volos	42
10.	Rumunia	Timisoara	51	24.	Polska	Katowice	42
11.	Rumunia	Craiova	49	25.	Włochy	Modena	42
12.	Rumunia	Bucuresti	48	26.	Grecja	Athens	41
13.	Włochy	Torino	47	27.	Włochy	Brescia	41
14.	Polska	Zabrze	45				

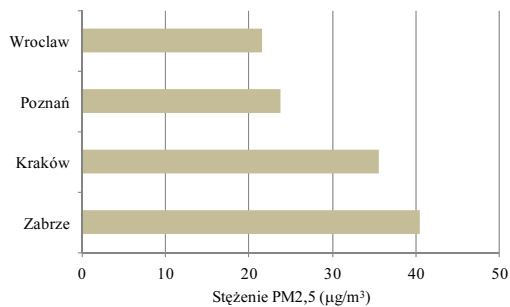


Tab. 6. Średnie roczne stężenie pyłu zawieszzonego PM2,5 powyżej 10 µg/m<sup>3</sup> w roku 2008 na stacjach monitoringu jakości powietrza w UE [WHO 2011b]

Lp.	Państwo	Miejscowość	Stężenie PM2,5 (µg/m <sup>3</sup> )	Lp.	Państwo	Miejscowość	Stężenie PM2,5 (µg/m <sup>3</sup> )
1.	Polska	Zabrze	40,4	38.	Dania	Aalborg	16,9
2.	Polska	Kraków	35,5	39.	Austria	Salzburg	16,7
3.	Włochy	Torino	34,4	40.	Niemcy	Frankfurt am Main	16,3
4.	Włochy	Milano	31,7	41.	Niemcy	Halle an der Saale	16,2
5.	Włochy	Brescia	31,1	42.	Francja	Rouen	16,2
6.	Grecja	Athens	27,4	43.	Holandia	Heerlen	16,2
7.	Czechy	Ostrava	27,4	44.	Czechy	Ceské Budejovice	15,9
8.	Słowacja	Žilina	25,1	45.	Niemcy	Mainz	15,7
9.	Austria	Graz	23,8	46.	Niemcy	Hamburg	15,7
10.	Polska	Poznań	23,7	47.	Niemcy	Nürnberg	15,7
11.	Francja	Paris	22,9	48.	Niemcy	Stuttgart	15,5
12.	Włochy	Parma	22,8	49.	Czechy	Usti nad Labem	15,5
13.	Włochy	Reggio nell Emilia	21,8	50.	Niemcy	Wiesbaden	15,5
14.	Polska	Wrocław	21,5	51.	Niemcy	Hannover	15,4
15.	Czechy	Zlín	21,1	52.	Niemcy	Kassel	15,2
16.	Belgia	Liège	20,8	53.	Niemcy	München	15,0
17.	Niemcy	Berlin	20,8	54.	Dania	København	14,8
18.	Belgia	Charleroi	20,3	55.	Szwajcaria	Zürich	14,7
19.	Włochy	Ancona	19,7	56.	Niemcy	Osnabrück	14,5
20.	Niemcy	Bremen	19,7	57.	Niemcy	Potsdam	14,5
21.	Włochy	Roma	19,7	58.	Niemcy	Lübeck	14,3
22.	Czechy	Liberec	19,6	59.	Niemcy	Magdeburg	14,1
23.	Włochy	Prato	19,6	60.	Holandia	Zaanstad	14,1
24.	Włochy	Rimini	19,5	61.	Szwecja	Göteborg	14,1
25.	Łotwa	Riga	19,4	62.	Hiszpania	Toledo	14,0
26.	Czechy	Brno	19,0	63.	Niemcy	Karlsruhe	13,9
27.	Austria	Linz	18,9	64.	Dania	Århus	13,9
28.	Holandia	Groningen	18,8	65.	Francja	Toulouse	13,9
29.	Belgia	Bruxelles / Brussel	18,7	66.	Czechy	Kladno	13,5
30.	Holandia	Rotterdam	17,9	67.	Wielka Brytania	London	13,5
31.	Francja	Le Havre	17,7	68.	Hiszpania	Madrid	13,1
32.	Holandia	Breda	17,6	69.	Niemcy	Saarbrücken	12,6
33.	Niemcy	Cottbus	17,4	70.	Niemcy	Augsburg	12,2
34.	Czechy	Pardubice	17,4	71.	Portugalia	Lisboa	11,9
35.	Czechy	Praha	17,3	72.	Szwecja	Malmö	11,2
36.	Holandia	s' Gravenhage	17	73.	Szwecja	Stockholm	10,6
37.	Czechy	Jihlava	16,9	74.	Norwegia	Trondheim	10,2



Rys. 13. Średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM10 w roku 2008 na stacjach monitoringu jakości powietrza w Polsce – kolorem pomarańczowym zaznaczono przekroczenie rocznej wartości dopuszczalnej  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (UE), a zielonym zalecanej przez WHO  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [WHO 2011b]



Rys. 14. Średnie roczne stężenie pyłu zawieszonego PM2,5 w roku 2008 na stacjach monitoringu jakości powietrza w Polsce [WHO 2011b]

W Polsce mierzone poziomy stężenie rocznych zarówno PM10, jak i PM2,5 są w większości stacji monitoringu w obszarach miejskich stosunkowo wysokie. Wyniki otrzymane przez WHO, nawet traktowane w sposób przybliżony, potwierdzają wyniki badań krajowych, że w Polsce obszarami odznaczającymi się złą jakością powietrza, ze względu na zanieczyszczenie pyłowe są „hot-spoty” obejmujące aglomeracje miejskie, w tym w szczególności Aglomerację Górnośląską i Rybnic-

ko-Jastrzębską, oraz Aglomerację Krakowską. Na taki stan rzeczy obok emisji istotny wpływ mają warunki meteorologiczne i ich zmienność czasowa.

### Literatura

- Abelsohn A., Stieb D.M., 2011, Health effects of outdoor air pollution. Approach to counseling patients using the Air Quality Health Index. *Can. Fam. Physician*, 57, 881-7
- EEA, 2010, European Environment Agency. The European environment - State and outlook 2010, Synthesis. EEA Copenhagen, 91-113
- ETC/ACC, 2008, Technical Paper 2008/13. Health impact and air pollution. An exploration of factors influencing estimates of air pollution impact upon the health of European citizens. European Topic Centre on Air & Climate Change. Bilthoven, [www.air-climate.eionet.europa.eu](http://www.air-climate.eionet.europa.eu)
- Kowalska M., Ośródk L., Klejnowski K., Zejda J.E., Krajny E., Wojtylak M., 2009, Air quality index and its significance in environmental health risk communication. *Archives of Environmental Protection*, 35(1), 13-21
- Kowalska M., Zejda J.E., Ośródk L., Chwirut A., Kondek P., 2008, Dzienna liczba hospitalizacji z powodu chorób układu krążenia i oddechowego a zanieczyszczenie powietrza w Zabrze, w latach 2001-2005. *Problemy Higieny i Epidemiologii*, 89(1), 41-46
- NAAQS, 2006, National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter; Final Rule. Federal Register, Vol. 71, No. 200 Tuesday, October 17, 2006, Rules and Regulations. 61144-61233, 71 FR 61144
- Ostro B., 2004, Outdoor air pollution - Assessing the environmental burden of disease at national and local levels. World Health Organization, Geneva. Environmental Burden of Disease Series No. 5
- Ostro B., Broadwin R., Green S., Feng W.Y., Lipsett M., 2006, Fine particulate air pollution and mortality in nine California counties: Results from CALFINE. *Environmental Health Perspectives*, 114, 29-33
- Ośródk L., Krajny E., Klejnowski K., Rogula-Kozłowska W., Błaszczuk J., Kobus D., Wypych A., 2011. Indeks jakości powietrza jako miara zanieczyszczenia powietrza w Polsce. *Nauka Przyr. Technol.* 5, 4
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 3 marca 2008 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu, Dz. U. Nr 47, poz. 281
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 marca 2008 r. w sprawie stref, w których dokonuje się oceny jakości powietrza, Dz. U. Nr 52, poz. 310
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska, Dz. U. 2008 Nr 25, poz. 150 (tekst jednolity) z późn. zm:
- Ustawa z dnia 16 września 2011 r. o zmianie ustawy o dostępie do informacji publicznej oraz niektórych innych ustaw, Dz. U. 2011 r. Nr 204 poz. 1195:
- WHO, 2006a, Health risks of particulate matter from long-range transboundary pollution. World Health Organization, Regional Office for Europe <http://www.euro.who.int/document/E88189.pdf>
- WHO, 2006b, Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. World Health Organization, Geneva
- WHO, 2011a, Urban outdoor air pollution database., Department of Public Health and Environment, World Health Organization, Geneva, Switzerland, <http://www.who.int/phe>
- WHO, 2011b, Outdoor air quality database. World Health Organization. Geneva, [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair\\_aqg/en/index.html](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair_aqg/en/index.html)
- Wypych A., Ostapowicz K., 2010, Opracowanie koncepcji przygotowania i weryfikacji danych oraz wykonania map wskaźnika zagrożenia aerosanitarnego Polski ze szczególnym uwzględnieniem obszaru województwa śląskiego i małopolskiego. Ekspertyza zrealizowana w ramach Projektu KLIMAT przez zewnętrznych wykonawców

## **Pogoda chemiczna a meteorologia**

*Leszek Ośródk, Marek Wojtylak, Ewa Krajny,  
Krzysztof Klejnowski*

Pogoda chemiczna to termin, który w ostatnich latach znajduje coraz większe uznanie. Emitowane do powietrza zanieczyszczenia pochodzące zarówno ze źródeł naturalnych, jak i antropogenicznych w wyniku procesów fizycznych, a także przemian chemicznych w atmosferze powodują, że jakość powietrza w czasie i przestrzeni staje się bardzo zmienna [Lawrence i in. 2005]. Ta zmienność zanieczyszczenia atmosfery przez analogię do zmienności pogody w sensie meteorologicznym potwierdza zasadność stosowania tego określenia. Zmiany stanu zanieczyszczenia atmosfery oczywiście zależą od wielu czynników, przy czym niebagatelną rolę odgrywają tu wspomniane przemiany chemiczne. Jednak w krótkotrwałych stanach atmosfery na zmiany jakości powietrza, w szczególności w zakresie zanieczyszczeń pyłowych, które stanowią najistotniejszy problem w Polsce w chłodnej porze roku, oddziałują warunki meteorologiczne [np. Baklanov 2010].

### **1. Wpływ warunków meteorologicznych na zanieczyszczenie pyłowe atmosfery**

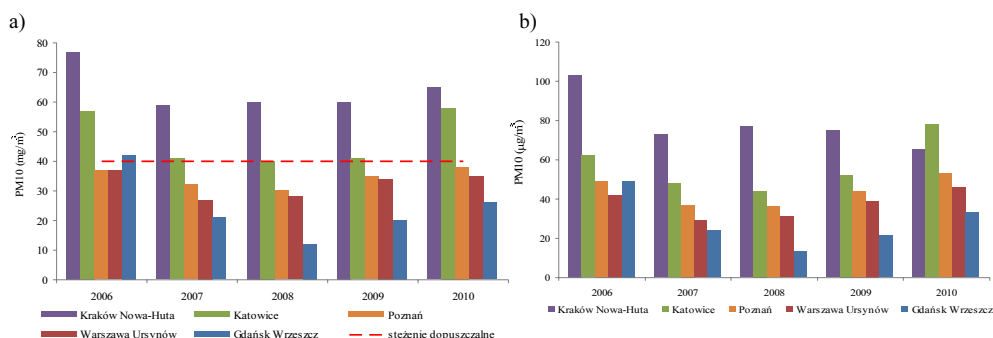
Między jakością powietrza atmosferycznego a warunkami meteorologicznymi istnieje sprzężenie zwrotne. Warunki pogodowe determinują transport substancji w powietrzu atmosferycznym, a zanieczyszczenia w atmosferze wpływają na pogodę i klimat.

Warunki pogodowe mogą oddziaływać na imisję pyłu między innymi przez:

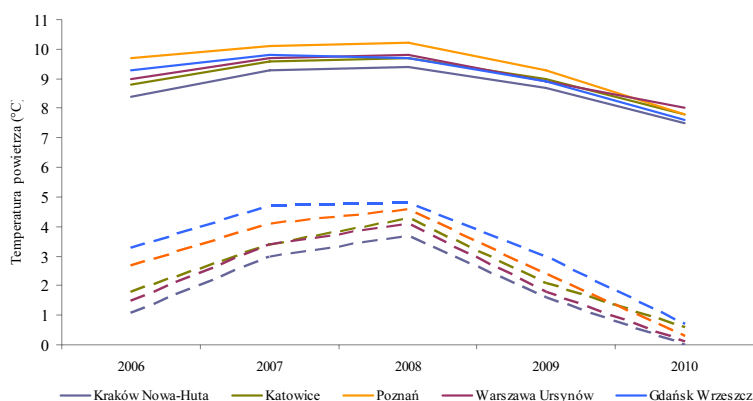
- termiczne sterowanie emisją, szczególnie komunalną (wzrost zapotrzebowania na ogrzewanie powoduje wzrost emisji),
- zwiększenie stężeń zanieczyszczeń pyłu związanych z niekorzystnymi warunkami wentylacyjnymi atmosfery.

Położenie Polski w strefie klimatu umiarkowanego przejściowego powoduje, że zmienność warunków pogodowych z roku na rok była zawsze naturalna. Nasilające się w ostatnich dziesięcioleciach ocieplenie klimatu sprawia, że zwiększa się udział zjawisk ekstremalnych [Ustrnul, Czekierda 2009; Lorenc H. (red.) 2005; Lorenc i in. 2012]. Występowanie ekstremalnych zjawisk pogodowych w chłodnej porze roku decyduje o dotrzymaniu rocznych standardów jakości powietrza w za-

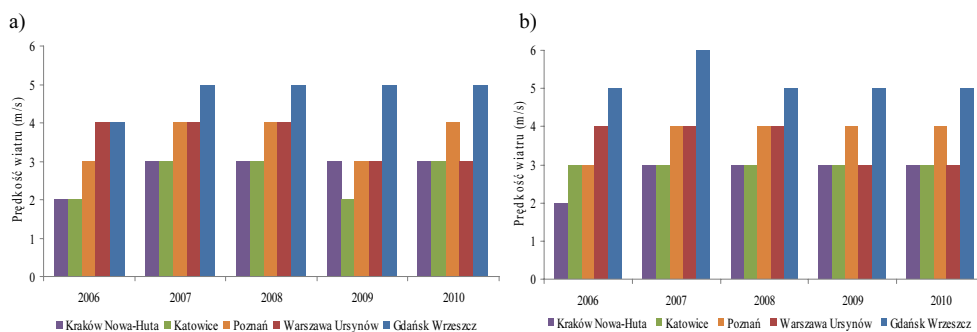
kresie pyłowych zanieczyszczeń atmosfery. Za przekroczenia stężeń dobowych odpowiadają wtedy natomiast warunki meteorologiczne sprzyjające powstawaniu tzw. epizodów, czyli sytuacji z wysokimi stężeniami pyłu zawieszonego, które związane są ze stacjonarnymi układami barycznymi o słabym zróżnicowaniu pola ciśnienia (słaby wiatr, niska temperatura powietrza, duża pionowa stabilność atmosfery).



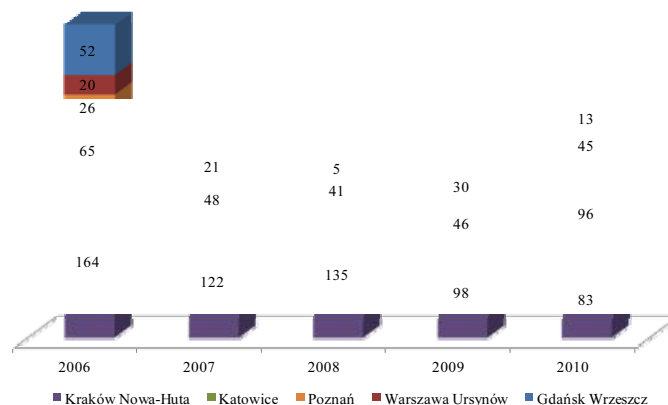
Rys. 1. Stężenie PM10 średnie roczne (a) i w sezonie zimowym (I-III, X-XII – b) w latach 2006-2010



Rys. 2. Średnia roczna (linie ciągłe) i dla sezonu zimowego (I-III, X-XII – linie przerywane) temperatura powietrza w latach 2006-2010



Rys. 3. Średnia roczna (a) i w sezonie zimowym (I-III, X-XII – b) prędkość wiatru w latach 2006-2010



Rys. 4. Liczba przypadków przekroczenia dobowego stężenia dopuszczalnego PM10 ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) powyżej dopuszczalnych 35 przypadków w roku w latach 2006-2010

Częstość wystąpienia takich sytuacji w danym roku rzutuje zarówno na poziom stężeń średniorocznych pyłu zawieszonego, jak i liczbę przekroczeń jego dobowych wartości dopuszczalnych.

W okresie 2006-2010 zdecydowanie wyróżnia się rok 2006, kiedy to dni z przekroczeniem wartości  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  na wszystkich analizowanych stacjach było znacznie więcej niż dopuszczalne 35 rocznie (rys. 4). Nie znajduje to jednak wprost odzwierciedlenia w uśrednionych do okresu rocznego lub sezonowego charakterystykach meteorologicznych: temperatury powietrza i prędkości wiatru (rys. 1-3). Jedynie w podziale na sezony letni (kwiecień - wrzesień) i zimowy widać zdecydowane zróżnicowanie zarówno średnich stężeń, jak i liczby dni z przekroczeniami wartości dopuszczalnej dobowej  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , co jest spowodowane sezonowym charakterem zmienności emisji.

Z względu na rozmiar przestrzenny epizody wysokich stężeń pyłu można podzielić na globalne obejmujące obszar prawie całego kraju, regionalne obejmujące kilka województw i lokalne występujące na terenie miasta lub aglomeracji.

Za występowanie epizodów globalnych odpowiadają stacjonarne układy baryczne o słabym zróżnicowaniu pola ciśnienia związane głównie z antycyklonalnymi i cyklonalnymi południowymi i wschodnimi typami cyrkulacji. Choć częstość występowania takich sytuacji wynosi w roku aż 12,3%, a w sezonie zimowym 10,8%, to do powstania globalnego epizodu dochodzi jednak nie częściej niż raz na kilka lat. Epizody te charakteryzują się względnie długim czasem trwania (3-5 dni) i są spowodowane najczęściej wpływami lokalnych źródeł zanieczyszczeń. Charakterystyczną ich cechą jest również zróżnicowany w czasie wpływ zanieczyszczeń z dalekiego transportu [GIOŚ 2008] z przeważającym udziałem dalekich i średnio oddalonych źródeł antropogenicznych. Udział źródeł naturalnych w stężeniach pyłu w takich epizodach w dużych aglomeracjach jest pomijalny, a w obszarach „czystych” – nieznaczny. Jak wynika z badań nad wpływem typów cyrkulacji (określanych metodą Lityńskiego) na powstawanie epizodów

pyłowych, większość długotrwałych przypadków przekroczeń stężeń pyłu PM10 na obszarze Aglomeracji Górnośląskiej i Krakowskiej jest związana z antycyklonalnymi typami cyrkulacji, przy czym wszystkie przypadki przekroczeń średniej dobowej wartości stężenia PM10 > 300 µg/m<sup>3</sup> dotyczą wyłącznie typów cyrkulacji antycyklonalnej.

Epizody regionalne pojawiają się w sytuacjach zróżnicowanego pola barycznego nad obszarem Polski i dotyczą w większości obszarów zurbanizowanych z częstością do kilku dni w roku. Zdarzają się na skraju (klina) układu wyżowego lub w sytuacjach nieokreślonych. I wówczas na kształtowanie się imisji zanieczyszczeń dominujący wpływ mają czynniki lokalne, choć napływ zanieczyszczeń dalekiego transportu bywa ukierunkowany [GIOŚ 2011]. Udział źródeł naturalnych w stężeniach pyłu jest nieznaczny.

Epizody lokalne zdarzają się w sytuacjach zróżnicowanego pola barycznego nad obszarem Polski. Choć dominują w przypadku występowania słabego układu wyżowego, pojawiają się także w sytuacjach cyklonalnych z umiarkowanym poziomym gradientem barycznym. Epizody te są zazwyczaj krótkotrwałe, a ich występowanie jest związane z oddziaływaniem lokalnych źródeł emisji. Częstość takich sytuacji to kilka, kilkanaście razy w roku.

Możliwość wystąpienia takich epizodów niewątpliwie zmniejsza komfort jakości życia, co stanowi istotne zagrożenie zdrowotne dla wrażliwych grup ludności. Istotne staje się więc prognozowanie takich sytuacji.

#### *Uwarunkowania prawne prognozy pogody chemicznej i stan obecny w Polsce*

Ustawa Prawo ochrony środowiska (POŚ) wprowadziła konieczność podjęcia działań krótkoterminowych z zakresu ochrony powietrza w danej strefie województwa w przypadku, gdy istnieje tam ryzyko przekroczenia dopuszczalnych, docelowych lub alarmowych poziomów niektórych substancji w powietrzu. W takiej sytuacji, zgodnie z art. 92, ust. 1 wspomnianej ustawy „... sejmik województwa, po zasięgnięciu opinii właściwego starosty, określi, w drodze uchwały, plan działań krótkoterminowych ...”. Plan działań ma zmniejszyć ryzyko wystąpienia przekroczeń dopuszczalnych i alarmowych poziomów substancji w powietrzu oraz ograniczenie skutków i czasu ich trwania (art. 92 ust. 1 pkt 1 i 2 POŚ).

Biorąc pod uwagę fakt, że o przekroczeniu stężeń dopuszczalnych, docelowych, a zwłaszcza alarmowych decyduje niekorzystna sytuacja meteorologiczna, plan działań krótkoterminowych w zakresie ochrony powietrza powinien skupiać się na ograniczeniu, w miarę możliwości, wprowadzania do atmosfery substancji szkodliwych w sytuacjach meteorologicznych sprzyjających nadmiernej koncentracji tych substancji w powietrzu oraz minimalizowaniu skutków wynikających z zaistnienia tego faktu.

Nowelizacja ustawy Prawo ochrony środowiska w związku z implementacją dyrektywy CAFE [Dyrektywa ... 2008] wprowadza dodatkowo sposób postępowania w przypadku ryzyka przekroczenia lub przekroczenia stężenia zanieczyszczeń powietrza zarówno na terenie kraju, jak i spowodowanych przeniesieniem zanieczyszczeń z terytorium innego państwa. Mówi o tym art. 24 „Plany działań



krótkoterminowych” oraz art. 25 „Transgraniczne zanieczyszczenie powietrza” rozdziału IV dyrektywy [Dyrektywa 2008] oraz art. 92a cytowanej ustawy POŚ.

Tak więc prognoza zanieczyszczeń powietrza, szczególnie w sytuacji z wysokimi stężeniami jest niezbędnym elementem działań krótkoterminowych.

Podejmowanie działań krótkoterminowych w wypadku ryzyka wystąpienia podwyższonych stężeń zanieczyszczeń ma specyficzny charakter. Działania w tym zakresie wymagają bowiem krótkiej skali czasowej (rzędu kilku godzin najwyżej kilku dni) i można je podzielić na organizacyjno-prawne i techniczne (monitoring i modelowanie). Działania administracyjne wymagają odrębnego, kompleksowego potraktowania. Natomiast zadania konieczne do realizacji tego przedsięwzięcia w sferze technicznej polegać powinny na:

- prognozowaniu jakości powietrza na okres od kilku do kilkudziesięciu godzin,
- monitorowaniu przebiegu epizodów, połączonym z diagnozą bieżącej sytuacji, dla potrzeb podejmowania decyzji o doraźnych ograniczeniach emisji.

Oczywiście skala czasowa prognozy w zależności od modelowanego zjawiska i dostępności danych pomiarowych może być natychmiastowa (nowcasting), ultra-krótkoterminowa, krótkoterminowa czy średnioterminowa, długoterminowa, długoterminowa sezonowa, klimatyczna.

W ochronie powietrza atmosferycznego przed zanieczyszczeniami pyłowymi i gazowymi wystarczającym horyzontem czasowym jest prognoza z krokiem 1-godzinnym i wyprzedzeniem 24 godzin.

Do prognozowania krótkoterminowego jakości powietrza mogą być wykorzystywane zarówno modele fizyczne, jak i matematyczne. Modele matematyczne można ponadto podzielić na symulacyjne i empiryczne [Markiewicz 2004]. Modele fizyczne opisują procesy zachodzące w rzeczywistej atmosferze na podstawie symulacji w mniejszej skali i mają ograniczone zastosowanie w opisie rozprzestrzeniania zanieczyszczeń. Matematyczne modele symulacyjne wykorzystują matematyczny opis procesów fizycznych i chemicznych zachodzących w atmosferze, a modele empiryczne opierają się na danych pomiarowych, które służą do opisanego zależności między wynikiem pomiaru a kształtowaniem się atmosferycznych procesów rozprzestrzeniania zanieczyszczeń [np. Araya 1999, Baklanov i in. 2009].

Krótkoterminowa prognoza jakości powietrza, choć coraz popularniejsza w świecie i Europie, w Polsce jest nadal rzadko stosowana. Wynika to zarówno z braku powszechnie akceptowanych modeli prognostycznych, jak i z faktu, że zastosowanie najdokładniejszych modeli fizycznych lub matematycznych wymaga dużych nakładów finansowych i merytorycznych. Jedną z poważnych trudności jest także brak dokładnych inwentaryzacji emisji, szczególnie ze źródeł powierzchniowych, które odgrywają dominującą rolę w kształtowaniu się pola emisji zwłaszcza pyłu zawieszonego. Pewną trudność powoduje też ograniczony dostęp do numerycznych mezoskalowych prognostycznych modeli pogody, które mogą zasilać moduł meteorologiczny modeli dyspersji zanieczyszczeń.

Według stanu z lutego 2012 roku w Polsce działa operacyjnie kilka systemów prognozy pogody chemicznej, wykorzystujących różne narzędzia modelowania. Są to przykładowo:

- System prognoz zaproponowany przez zespół pracowników Politechniki Warszawskiej, jako wynik współpracy jej przedstawicieli w Akcji COST ES 0602 „Towards a European Network on Chemical Weather Forecasting and Information Systems”. Jako narzędzie obliczeniowe wykorzystuje on kanadyjski model GEM-AQ. Jest to globalny model chemii troposfery pozwalający na jednoczesne i spójne modelowanie procesów dynamicznych, fizycznych i chemicznych w atmosferze [Kamiński i in. 2008].
- Stosowany na terenie Aglomeracji Trójmiejskiej system krótkoterminowej prognozy jakości powietrza oparty na gaussowskim (lagranżowskim) modelu obłoku CALMET/CALPUFF ([http://www.armaag.gda.pl/indeks\\_jakosci\\_powietrza/prognoza.htm](http://www.armaag.gda.pl/indeks_jakosci_powietrza/prognoza.htm)).

Niewątpliwą zaletą tych modeli jest możliwość prognozowania pola stężeń, natomiast wadą konieczność zasilania ich nie zawsze kompletnie przygotowywanymi danymi emisyjnymi oraz czas obliczeń.

Dla województwa śląskiego w Zakładzie Monitoringu i Modelowania Zanieczyszczeń Powietrza IMGW-PIB opracowano w latach 2002-2004 model empiryczny prognozy jakości powietrza oparty na metodach eksploracji danych [Ośródką i in. 2008a, 2010a]. Choć nie wykorzystuje on wprost fizycznych związków między emisją i meteorologią a stężeniem zanieczyszczeń, to pozwala w sposób skuteczny zależność taką przedstawić. Jego niewątpliwą zaletą jest szybkość uzyskania rezultatów i dobra sprawdzalność, wadą natomiast przyjęcie założenia, że aktualne warunki emisji odpowiadają tym obserwowanym w historii. Model został wdrożony do działalności operacyjnej w 2005 roku dla potrzeb WIOŚ w Katowicach (<http://spjp.katowice.pios.gov.pl>).

W trakcie realizacji projektu KLIMAT opracowano zmodyfikowany model prognozy, redukując jego zakres do najgroźniejszych w chłodnej porze roku zagrożeń związanych z epizodami pyłowymi, ale rozszerzając jego zastosowanie na obszar całego kraju.

#### *Określenie stopnia potencjalnego zagrożenia smogowego – podstawy metodyczne*

W Zakładzie Monitoringu i Modelowania Zanieczyszczeń Powietrza IMGW-PIB od wielu lat stosuje się matematyczne metody empiryczne do diagnozy i prognozy relacji między atmosferą a zanieczyszczeniem powietrza. [Ośródką i in. 2008b, 2010b]. Doświadczenia ze stosowania tych metod wskazują, że są one doskonałą alternatywą metod opartych na związkach fizycznych zwłaszcza w sytuacjach, gdy jest wymagana nie tyle precyzyjna co szybka diagnoza bądź prognoza skali zagrożenia. Takie sytuacje dotyczą na przykład prognozy możliwości wystąpienia alarmowych poziomów stężeń zanieczyszczeń.

Celem tej części pracy było opracowanie metody identyfikacji czynników meteorologicznych odpowiedzialnych za globalne i regionalne epizody wysokich stężeń pyłu zawieszonego, jako modułu do prognozy zagrożenia takimi zjawiskami w skali całego kraju przy wykorzystaniu eksploracji danych.

Analiza była dwuetapowa:

- a) identyfikacja epizodów smogowych w skali całego kraju,

b) identyfikacja sytuacji meteorologicznych związanych z epizodami.

Do badań wykorzystano wszystkie dostępne dane z lat 2006-2010 ze stacji pomiaru jakości powietrza PM<sub>10</sub> w Polsce, bez względu na ich przeznaczenie (stacje miejskie, komunikacyjne, tła regionalnego) i metody pomiarowe (stacje automatyczne, manualne), a także dane z odpowiednich stacji meteorologicznych PSHM IMGW-PIB.

Najpierw należało ujednoczyć dane, zastępując wartości bezwzględne stężeń PM<sub>10</sub> prawdopodobieństwem wystąpienia w danym miejscu takiego stężenia. Mając ciąg pomiarów  $x_1, \dots, x_n$  dla każdej stacji obliczono to prawdopodobieństwo:

$$p_i = \frac{|\{x \in \{x_1, \dots, x_n\}; x \geq x_i\}|}{n}, \text{ gdzie } |\cdot| \text{ oznacza moc zbioru, } i=1, \dots, n.$$

W ten sposób pomiar scharakteryzowano częstością jego występowania wraz z wartościami wyższymi.

Następnie dla każdej doby obliczono dla wszystkich mierzących w ten dzień stacji, średnie prawdopodobieństwo, otrzymując uśrednioną sytuację aerosanitarną w całej Polsce. Im średnie prawdopodobieństwo mniejsze, tym powietrze jest bardziej zanieczyszczone pyłem PM<sub>10</sub>.

$$\text{Pr}(\text{dzień, miesiąc, rok}) = \frac{\sum_{k=1}^N p_k}{N}$$

gdzie  $N$  jest liczbą działających w danym dniu stacji pomiarowych.

Dla wybranych dni z epizodami przypisano odpowiadające im warunki meteorologiczne ze stacji PSHM IMGW-PIB. Przyjęto, że spośród czynników meteorologicznych, które wpływają na zwiększoną koncentrację pyłu PM<sub>10</sub>, największe znaczenie mają: temperatura i wilgotność powietrza, wektor wiatru, wysokość warstwy mieszania, natężenie promieniowania słonecznego, opad atmosferyczny. Czynniki te odpowiadają za różne procesy, które wynikowo kształtują wielkość emisji pyłu (emisja pyłu pierwotnego, emisja zanieczyszczeń gazowych, z których w atmosferze formuje się pył wtórny, intensywność rozpraszania i inne), przy czym, co oczywiste, stężenie pyłu nie zależy liniowo od poszczególnych elementów meteorologicznych. Nie wszystkie wymienione elementy są obserwowane na stacjach meteorologicznych, w konsekwencji do analizy wykorzystano więc 12 parametrów: wysokość podstawy chmur piętra niskiego  $C_L$  i średniego  $C_M$ , widzialność, zachmurzenie ogólne, kierunek i prędkość wiatru, temperatura powietrza, ciśnienie pary wodnej, wilgotność względna powietrza, temperatura punktu rosy, ciśnienie atmosferyczne n.p.m., suma dobową opadu, zachmurzenie przez chmury piętra niskiego. Parametry te uśredniano do doby i dla całego obszaru Polski. Zatem sytuacja meteorologiczna w każdej dobie została opisana wektorem o 12 współrzędnych.

Aby wyróżnić typy sytuacji meteorologicznych dokonano grupowania tych wektorów. Jako metodę grupowania przyjęto wykorzystanie sieci neuronowej Ko-

honena [1997]. Dla uzyskanych grup sytuacji porównano wcześniej obliczone prawdopodobieństwa  $Pr(d,m,r)$ . Wyróżniono 7 grup (typów) pogody, dla których prawdopodobieństwa były najmniejsze.

Aby sprawdzić jakość grupowania, dokonano wizualizacji wektorów z przestrzeni  $R^{12}$  z zastosowaniem rzutowania Sammona, które pozwala na graficzne przedstawienie danych wielowymiarowych na płaszczyźnie [Sammon 1969]. Dane meteorologiczne można postrzegać jako  $h$ (high)-wymiarowe punkty (wektory przestrzeni  $R^h$ ). Przestrzeń  $h$ -wymiarową dla  $h > 3$  trudno sobie wyobrazić. W pracy [Beyer i in. 1999] pokazano, że przy rosnącej wymiarowości danych rzeczywistych odległość każdego punktu do najbliższego sąsiada zbliża się do odległości do najdalszego. W tym przypadku użycie metody k-Najbliższych Sąsiadów (k-NN) przestaje mieć większy sens, przy czym efekt ten może być widoczny już dla 10-15 wymiarów. Rzeczywiste dane meteorologiczne pochodzą z pomiaru paru zmiennych, przy czym część z tych zmiennych jest uzależniona od innych z nich. Dane reprezentowane jako punkty (wektory)  $h$ -wymiarowe są tak „naprawdę”  $l$ (low)-wymiarowe. W naszym przypadku przyjęto  $l = 2$  (płaszczyzna).

Główna idea tego algorytmu to rozmieszczenie punktów w przestrzeni o niższym wymiarze, tak by odległości między parami punktów były jak najlepiej zachowane. Jest to algorytm iteracyjny. Jakość rzutowania określa wzór na naprężenie (stress), które zależy od odległości między punktami w  $R^h$  i odpowiadającymi im punktami  $R^2$ . Gdy odległość między danymi zrzutowanymi jest porównywalna do odległości pierwotnych, to naprężenie jest małe. Rozmieszczamy losowo punkty w przestrzeni  $R^2$ , a następnie poprawiamy ich położenia, wykorzystując metodę gradientową minimalizacji funkcji naprężenia.

Efektem opisanych działań jest katalog sytuacji meteorologicznych wraz ze skutkami występowania wysokich, średnich, niskich stężeń PM10.

Prognoza wystąpienia zidentyfikowanych typów warunków meteorologicznych odpowiadających za epizody wysokich stężeń zanieczyszczeń pozwala na predykcję warunków aerosanitarnych na obszarze całego kraju.

#### *Wybór kryteriów klasyfikacji zagrożenia epizodami wysokich stężeń zanieczyszczeń*

Problem wyodrębnienia tzw. epizodu wysokich stężeń zanieczyszczeń można rozpatrywać biorąc pod uwagę co najmniej trzy aspekty: prawny, zdrowotny i statystyczny.

Z prawnego punktu widzenia za epizod tego typu można by uznać każde przekroczenie dopuszczalnej wartości dobowej. Ze względów zdrowotnych za epizod należałoby uznać zaś dzień ze średnim dobowym stężeniem PM10 lub PM2,5 przekraczającym wartość uznaną przez środowisko medyczne za szkodliwą dla zdrowia. Z kolei biorąc pod uwagę kryteria statystyczne za epizod należałoby uznać sytuacje, podczas których stężenie średnie dobowe pyłu PM10 lub PM2,5 przekraczałyby wartość określonego kwantyla rozkładu (np. 95 percentyl).

Obowiązujące w Polsce i krajach UE unormowania prawne dotyczące dopuszczalnych 24-godzinnych stężeń pyłu zawieszonego PM10 są identyczne z zalecanymi przez WHO. Jednak uznanie normowanej wartości stężenia dobowe-

go  $PM_{10} = 50 \mu g/m^3$  za granicę epizodu doprowadziłyby do tego, że stałby on się powszechny i – choć za jej przyjęciem przemawia także kryterium zdrowotne – nie pozwoliłoby na identyfikację czynników meteorologicznych powodujących jego powstawanie. Stosując ten tok rozumowania, tj. ustalając sztywną granicę stężenia, od którego istniałby epizod wysokich stężeń pyłu, należy rozważyć, czy za dzień z epizodem nie przyjąć dnia ze średnim dobowym stężeniem pyłu  $PM_{10}$  przekraczającym dwu- lub trzykrotność dobowego stężenia dopuszczalnego. Taki algorytm został np. przyjęty w Czechach [Blažek i in. 2010], gdzie epizod pyłowy to dzień ze stężeniem dobowym  $PM_{10} > 150 \mu g/m^3$ . Poza obszarami silnie zanieczyszczonymi takie stężenia pyłu występują jednak rzadko, co także może utrudnić właściwą interpretację wpływu warunków meteorologicznych na jakość powietrza.

W rezultacie w celu dokonania klasyfikacji dni z epizodami zdecydowano się na zastosowanie podejścia „wielokrotnościowego” przyjmując, że:

- dniem z epizodem I stopnia będzie każde przekroczenie średniego dobowego stężenia pyłu  $PM_{10} > 50 \mu g/m^3$ , czyli dobowej wartości dopuszczalnej,
- dniem z epizodem II stopnia będzie każde przekroczenie średniego dobowego stężenia pyłu  $PM_{10} > 100 \mu g/m^3$ ,
- dniem z epizodem III stopnia będzie każde przekroczenie średniego dobowego stężenia pyłu  $PM_{10} > 150 \mu g/m^3$ ,
- dniem z epizodem IV stopnia będzie każde przekroczenie średniego dobowego stężenia pyłu  $PM_{10} > 200 \mu g/m^3$ , czyli wartości progowej tzw. poziomu alarmowego.

Jednocześnie każdy dzień wystąpienia takiego zjawiska lub ciąg następujących po sobie dni będzie nazwany epizodem wysokich stężeń pyłu zawieszonego.

#### Diagnoza sytuacji

W latach 2006-2010 obserwowano zmienną liczbę dni z epizodami pyłowymi. Najwięcej ich zanotowano w 2006 roku, a także w 2010 roku, przy czym istnieje zależność między liczbą epizodów a warunkami meteorologicznymi w poszczególnych latach.

Analiza prawdopodobieństwa przekroczenia wartości progowych dla dni z epizodami różnego stopnia pozwoliła na dokonanie rankingu stacji pod względem prawdopodobieństwa wystąpienia takiego zdarzenia (tab. 1-2).

Tab. 1. Prawdopodobieństwo wystąpienia epizodu I stopnia, tj. przekroczenia średniego dobowego stężenia  $PM_{10} > 50 \mu g/m^3$  dla poszczególnych stacji PMŚ

Lp.	Stacja monitoringowa	Prawdopodobieństwo	Typ stacji	Typ obszaru
1.	Kraków Al. Krasińskiego	0,744	komunikacyjna	miejski
2.	Kraków Nowa Huta	0,502	tło miejskie (w strefie oddziaływania przemysłu)	miejski
3.	Warszawa Al. Niepodległości	0,442	komunikacyjna	miejski
4.	Chorzów	0,431	komunikacyjna	miejski
5.	Kraków Krowodrza	0,412	tło miejskie	miejski
6.	Zabrze	0,365	tło miejskie	miejski

Lp.	Stacja monitoringowa	Prawdopodobieństwo	Typ stacji	Typ obszaru
7.	Rybnik	0,344	tło miejskie	miejski
8.	Katowice	0,335	tło miejskie	miejski
9.	Koniczynka	0,298	tło regionalne	pozamiejski
10.	Gorzów Wlkp.	0,294	tło miejskie	miejski
11.	Bydgoszcz	0,270	tło miejskie	miejski
12.	Rzeszów	0,259	tło miejskie	miejski
13.	Jelenia Góra-Cieplice	0,252	tło miejskie	miejski
14.	Opole	0,207	tło miejskie	miejski
15.	Bydgoszcz	0,191	komunikacyjna	miejski
16.	Włocławek	0,178	komunikacyjna	miejski
17.	Łódź	0,177	komunikacyjna	miejski
18.	Ząbkowice Śląskie	0,175	tło miejskie	miejski
19.	Poznań	0,173	tło miejskie	miejski
20.	Belsk Duży	0,167	tło regionalne	pozamiejski
21.	Warszawa-Ursynów	0,127	tło miejskie	miejski
22.	Oława	0,122	tło miejskie	tło miejskie
23.	Kielce	0,120	komunikacyjna	miejski
24.	Toruń	0,117	komunikacyjna	miejski
25.	Rudna	0,114	w strefie oddziaływania przemysłu	pozamiejski
26.	Złoty Potok	0,109	tło regionalne	pozamiejski
27.	Świecie	0,097	w strefie oddziaływania przemysłu	podmiejski
28.	Lublin	0,093	tło miejskie	miejski
29.	Gdańsk Wrzeszcz	0,087	tło miejskie	miejski
30.	Dzierżoniów	0,085	tło miejskie	miejski
31.	Wleń	0,083	tło regionalne	pozamiejski
32.	Łódź-Widzew	0,079	tło miejskie	miejski
33.	Gdynia Pogórze	0,075	tło miejskie	miejski
34.	Szczecin	0,068	tło miejskie	miejski
35.	Wałbrzych	0,064	tło miejskie	miejski
36.	Kalinówka	0,061	w strefie oddziaływania przemysłu	pozamiejski
37.	Olsztyn	0,059	tło miejskie	miejski
38.	Bogatynia	0,055	w strefie oddziaływania przemysłu	miejski
39.	Gajew	0,053	tło regionalne	pozamiejski
40.	Górne Gruczno	0,051	w strefie oddziaływania przemysłu	pozamiejski
41.	Witka	0,047	w strefie oddziaływania przemysłu	pozamiejski
42.	Tarnówek	0,041	w strefie oddziaływania przemysłu	pozamiejski
43.	Zgorzelec	0,041	w strefie oddziaływania przemysłu	miejski
44.	Radomierzyce	0,036	w strefie oddziaływania przemysłu	pozamiejski
45.	Biały Słup	0,027	tło regionalne	pozamiejski
46.	Wyszków	0,026	w strefie oddziaływania przemysłu	pozamiejski
47.	Jasna Góra	0,018	w strefie oddziaływania przemysłu	pozamiejski
48.	Sadlogoszcz	0,012	tło regionalne	pozamiejski
49.	Czemiawa	0,003	tło regionalne	pozamiejski

Spośród badanych stacji największe prawdopodobieństwo wystąpienia epizodu wszystkich stopni obserwuje się na stacji Kraków Aleja Krasińskiego (0,744). W zbiorze stacji, na których prawdopodobieństwo przekroczenia wystąpienia dnia z epizodem I stopnia jest większe od 0,300 są jeszcze 2 stacje krakowskie (Nowa Huta, Krowodrza), Warszawa – stacja komunikacyjna i 4 stacje z województwa śląskiego: Chorzów, Zabrze, Rybnik i Katowice.

Tab. 2. Prawdopodobieństwo wystąpienia epizodu II, III i IV stopnia, tj. przekroczenia średniego dobowego stężenia pyłu zawieszonego odpowiednio  $PM_{10} > 100$ ,  $150$  i  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dla poszczególnych stacji PMS–

PM10 > 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ epizod II stopnia			PM10 > 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ epizod III stopnia			PM10 > 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ epizod IV stopnia		
Lp.	Stacja monitoringowa	Prawdopodobieństwo	Lp.	Stacja monitoringowa	Prawdopodobieństwo	Lp.	Stacja monitoringowa	Prawdopodobieństwo
1.	Kraków Al. Krasińskiego	0,271	1.	Kraków Al. Krasińskiego	0,112	1.	Kraków Al. Krasińskiego	0,045
2.	Kraków Nowa Huta	0,160	2.	Jelenia Góra-Cieplice	0,064	2.	Jelenia Góra-Cieplice	0,044
3.	Kraków Krowodrza	0,127	3.	Kraków Nowa Huta	0,059	3.	Rybnik	0,028
4.	Jelenia Góra-Cieplice	0,099	4.	Rybnik	0,039	4.	Kraków Nowa Huta	0,019
5.	Rybnik	0,097	5.	Kraków Krowodrza	0,037	5.	Zabrze	0,019
6.	Zabrze	0,093	6.	Zabrze	0,035	6.	Kraków Krowodrza	0,018
7.	Gorzów Wlkp.	0,069	7.	Katowice	0,027	7.	Bydgoszcz	0,008
8.	Katowice	0,063	8.	Gorzów Wlkp.	0,023	8.	Chorzów	0,008
9.	Bydgoszcz	0,063	9.	Bydgoszcz	0,022	9.	Opole	0,008
10.	Chorzów	0,058	10.	Chorzów	0,018	10.	Katowice	0,007

Dla dni z epizodem II i III stopnia ranking stacji nie ulega większym zmianom; w pierwszej dziesiątce poza stacją Kraków Aleja Krasińskiego znajdują się jeszcze 2 inne stacje z tego miasta. Wysoko w tej klasyfikacji znajdują się stacje w Jeleniej Górze – Cieplicach i Rybniku.

Dla dni epizodów o stężeniach średnich dobowych  $PM_{10} > 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (IV stopnia) interesujące jest grupowanie się równo prawdopodobnych wystąpień takich sytuacji (Kraków, Al. Krasińskiego – Jelenia Góra, a także Kraków Nowa Huta – Zabrze – Kraków Krowodrza; Bydgoszcz – Chorzów – Opole – Katowice).

Przedstawione wyniki pokazują, że obok obszarów o tradycyjnie dużych zanieczyszczeniach pyłem (Kraków, Górny Śląsk, Kotlina Jeleniogórska), częste przekroczenia przyjętych kryteriów obserwuje się również w Opolu czy Bydgoszczy. Brak niestety dostatecznej liczby pomiarów dla niektórych miejscowości (Zakopane, Wrocław) uniemożliwia przekazanie pełnej charakterystyki tych zjawisk w Polsce. Ranking prawdopodobieństwa wystąpienia wysokich epizodów pyłowych potwierdził także, że szczególnie narażone są silnie zurbanizowane obszary województwa śląskiego i małopolskiego.



### *Identyfikacja zespołu warunków meteorologicznych odpowiedzialnych za epizody globalne i regionalne*

Jednym z celów pracy była identyfikacja czynników meteorologicznych opowiadających za możliwość wystąpienia epizodów, a także określenie ich przestrzennego zasięgu. W tym przypadku posługiwano się bezwzględnymi wartościami stężeń zależnych m.in. od warunków emisji nie zdałoby egzaminu. Należało zatem odstąpić od tej charakterystyki i oprzeć się na prawdopodobieństwie wystąpienia danej wartości stężenia na danej stacji. W tym celu każdemu stężeniu PM10 na każdej stacji przypisano odpowiadające mu prawdopodobieństwo. W dalszym ciągu postępowania wybrano dni z prawdopodobieństwem mniejszym od 0,05 zakładając, że odpowiada ono sytuacjom znaczących epizodów PM10.

W całym analizowanym okresie wyodrębniono 12 takich dni:

- w 2006 roku: 9, 23, 25, 26, 27, 28, 29 stycznia,
- w 2009 roku 14 stycznia, 12 grudnia,
- w 2010 roku: 25, 26 stycznia i 9 lutego.

Dla zidentyfikowanych dni badano, na ilu stacjach prawdopodobieństwo przekroczenia wartości krytycznej stężenia PM10 było mniejsze od 0,05. Jeżeli udział takich stacji przekraczał 80% ich całkowitej populacji uznawano, że epizod miał charakter globalny. W innym przypadku epizod ten klasyfikowano do epizodów regionalnych lub lokalnych. Listę epizodów globalnych przedstawiono w tab. 3.

Tab. 3. Katalog epizodów globalnych PM10

Data	2006			2009	2010	
	26 stycznia	27 stycznia	28 stycznia	14 stycznia	25 stycznia	26 stycznia
Udział stacji w całkowitej ich populacji (%)	100,0	90,9	80,0	77,1	88,9	85,3

W latach 2006-2010 na terenie Polski zanotowano 6 dni z epizodem globalnym, z czego w 2006 roku był to okres trzydniowy, w 2010 dwudniowy, a w 2009 jednodniowy. Wszystkie epizody globalne wystąpiły w styczniu. Największy zasięg przestrzenny (100% stacji) wystąpił 26 stycznia 2006 roku.

Dokładną analizę epizodu ze stycznia 2010 roku i jego przebiegu na terenie województwa śląskiego przedstawiono w następnym rozdziale.

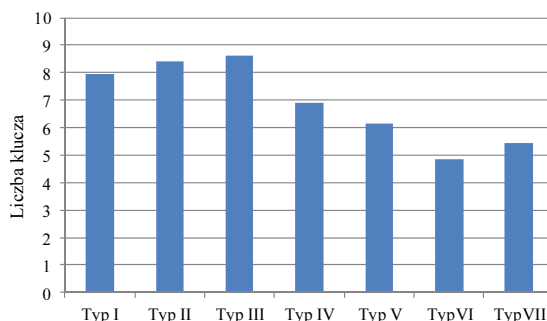
Tab. 4. Katalog epizodów globalnych i regionalnych PM10

Rok	2006	2007	2008	2009	2010
Dzień	8-9, 16, 23, 25-29 stycznia	2 kwietnia	30 grudnia	14 stycznia 20 grudnia	7-8, 24-26 stycznia 9-10, 17-18 lutego 18, 22 grudnia

W tabeli 4 przedstawiono listę dni epizodów globalnych i regionalnych, które wystąpiły w latach 2006-2010 w Polsce, na podstawie których dokonano klasyfikacji typów warunków meteorologicznych.

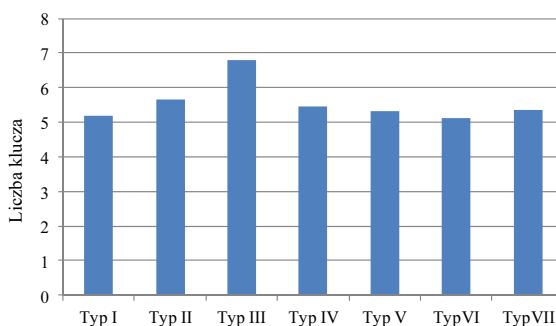
Wykorzystując sieć neuronową Kohonena wyodrębniono 7 typów warunków meteorologicznych odpowiadających za te epizody.

Liczba klucza	Wysokość podstawy chmur
0	0-50 m
1	50-100 m
2	100-200 m
3	200-300 m
4	300-600 m
5	600-1000 m
6	1000-1500 m
7	1500-2000 m
8	2000-2500 m
9	> 2500 m



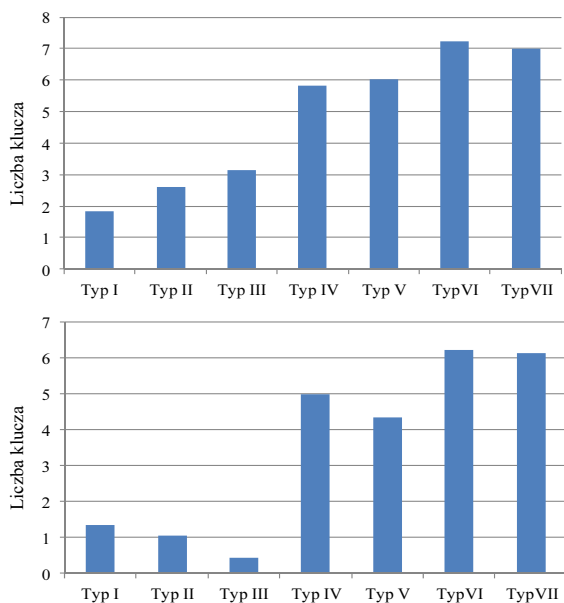
Rys. 5. Siedem typów wysokości podstawy chmur piętra niskiego (CL) – liczba klucza od 0 do 8 i średniego (CM) (liczba klucza 9) dla epizodów PM

Liczba klucza	Widzialność pozioma
0	<50 m
1	50-200 m
2	200-500 m
3	500-1000 m
4	1-2 km
5	2-4 km
6	4-10 km
7	10-20 km
8	20-50 km
9	> 50 km

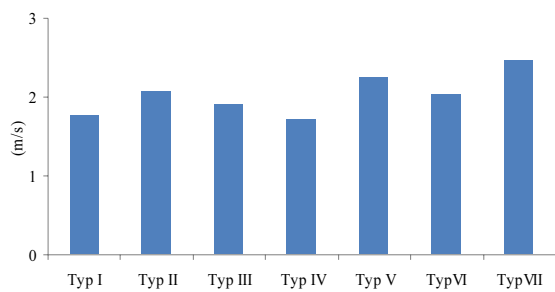


Rys. 6. Siedem typów widzialności poziomej dla epizodów PM

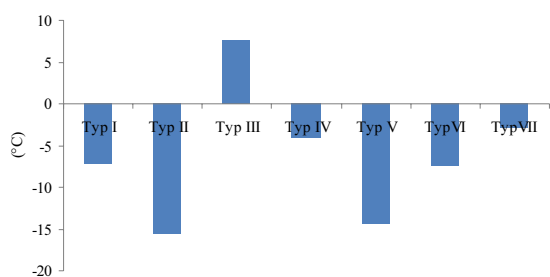
Liczba klucza	Wielkość zachmurzenia
0	0/8
1	1/8 lub mniej
2	2/8
3	3/8
4	4/8
5	5/8
6	6/8
7	7/8 lub więcej
8	8/8



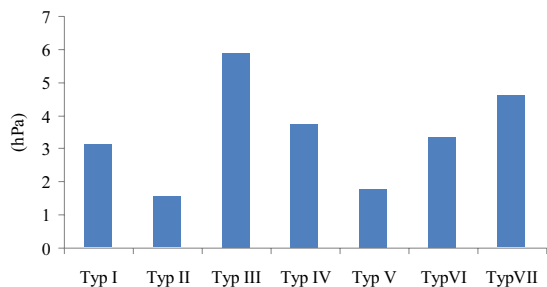
Rys. 7. Siedem typów zachmurzenia ogólnego (górny rysunek) i zachmurzenia niskiego (dolny rysunek) dla epizodów PM (skala oktantowa)



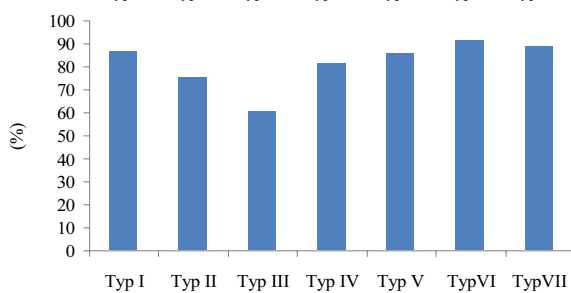
Rys. 8. Siedem typów prędkości wiatru dla epizodów PM



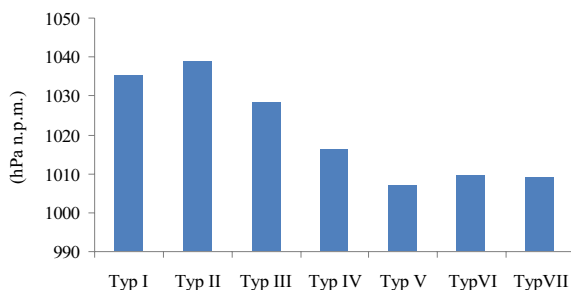
Rys. 9. Siedem typów temperatury powietrza dla epizodów PM



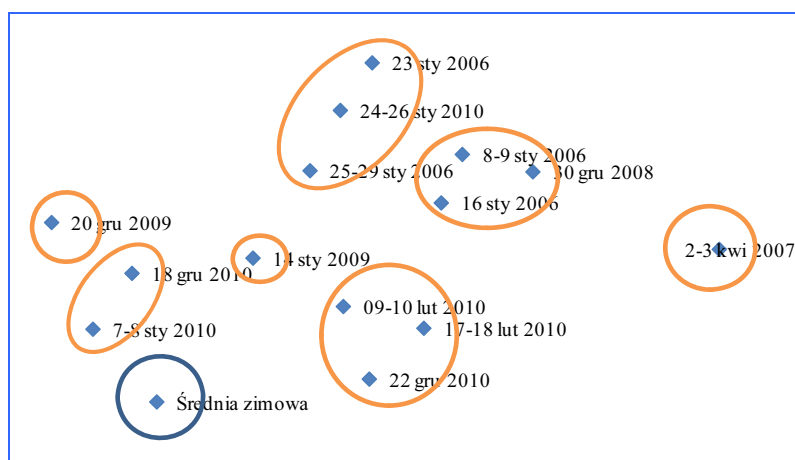
Rys. 10. Siedem typów prężności pary wodnej dla epizodów PM



Rys. 11. Siedem typów wilgotności względnej powietrza dla epizodów PM



Rys. 12. Siedem typów ciśnienia atmosferycznego nad poziomem morza dla epizodów PM



Rys. 13. Wizualizacja wyników odwzorowania Sammona epizodów globalnych i regionalnych w Polsce dla lat 2006-2010

Stosując metodę rzutowania Sammona przedstawiono graficznie podobieństwo cech meteorologicznych analizowanych epizodów (rys. 13).

Przedstawione klasy epizodów globalnych i regionalnych charakteryzują się zbliżonym zespołem warunków meteorologicznych o niewielkiej zmienności przestrzennej. Na uwagę zasługuje fakt, że epizody o podobnych wartościach bezwzględnych zanieczyszczeń grupują się w tych samych klasach. W szczególności do tej samej genetycznie klasy należą dwa spośród największych epizodów z lat 2006 i 2010.

Klasyfikacja epizodów globalnych i regionalnych ze względu na podobieństwo cech meteorologicznych (zespołu czynników meteorologicznych), z których każdy element może być prognozowany, pozwala na wykorzystanie tego algorytmu do znajdowania w prognozie potencjalnych sytuacji odpowiadających za powstawanie tego typu zdarzeń.

W tabeli 5 na tle zestawienia występowania epizodów III i IV stopnia w województwie śląskim i małopolskim przedstawiono wyznaczone epizody globalne i regionalne. Jak widać liczba dni epizodów wysokich stężeń zanieczyszczeń PM jest zróżnicowana przestrzennie i czasowo. Zależność przestrzenna wynika zarówno z czynników geograficznych (sytuacja synoptyczna, położenie geograficzne, warunki topograficzne, klimat lokalny w tym warunki wentylacyjne), jak i społeczno-ekonomicznych (gęstość zaludnienia, uprzemysłowienie, wielkość i rodzaj emisji). Czasowa zmienność liczby epizodów jest natomiast silnie związana ze zmiennością warunków meteorologicznych.

Jednocześnie warto zauważyć, że większość zidentyfikowanych na podstawie podobieństwa sytuacji meteorologicznych dni z epizodami globalnymi i regionalnymi pokrywa się z zaobserwowanymi na obszarze województwa śląskiego i małopolskiego dniami z epizodami III i IV stopnia.

Tab. 5. Zestawienie sytuacji ze średnim dobowym stężeniem PM10 > 150 µm/m<sup>3</sup> na co najmniej 25% stacji w województwie śląskim i/lub małopolskim w latach 2006-2010 w sezonie zimowym (I-III, X-XII) na tle epizodów globalnych (X) i regionalnych (x)

Rok	Mie- siąc	Dzień																																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
2006	I							x	x								x							x										
	II																																	
	XI																																	
2007	III																																	
	XI																																	
	XII																																	
2008	I																																	
	II																																	
	XI																																	
	XII																																	
2009	I																																	
	II																																	
	III																																	
	XI																																	
	XII																																	
2010	I							x	x																									
	II																																	
	X																																	
	XI																																	
	XII																																	

województwo		
śląskie i małopolskie	śląskie	małopolskie

### Podsumowanie

Postępujące zmiany klimatu manifestują się między innymi coraz częstszym występowaniem ekstremalnych, nietypowych warunków meteorologicznych. Obok fali ciepła, gwałtownych opadów, nasilenia się huraganów należą do nich niewątpliwie długotrwałe stagnacje mas powietrza związane z wytwarzaniem się tzw. blokad wyżowych. Sytuacje takie świadczące o zmianach w warunkach cyrkulacyjnych sprzyjają wzrostowi potencjalnego zagrożenia smogiem szczególnie zaś, w związku ze strukturą emisji w Polsce, epizodom wysokich stężeń pyłu zawieszonego. Niebezpieczeństwo występowania zdarzeń skutkujących przekroczeniem alarmowych poziomów stężeń pyłu PM dotyczy co prawda niektórych obszarów Polski (głównie w województwach małopolskim, śląskim i dolnośląskim), jednak – ze względu na brak dostatecznej ilości danych o emisji komunalnej i niezbyt gęstą sieć pomiarową – rozpoznanie rzeczywistej skali tego zjawiska może być niewystarczające. Szczególnie istotne wydają się sytuacje, które odpowiadają za tzw. epizody globalne i regionalne. Zdarzają się one na terenie całej Polski, najczęściej od grudnia do lutego (wyjątek: epizod kwietniowy w 2007 roku), ale także czasami

w listopadzie, np. sytuacja nie objęta niniejszym opracowaniem – epizod z listopada 2011 roku. Pod względem synoptycznym odpowiadają za nie najczęściej układy wysokiego ciśnienia charakteryzujące się niską temperaturą i słabymi warunkami wentylacyjnymi. Opracowana metodyka wykorzystująca eksplorację danych pozwala na identyfikację takich sytuacji przy wykorzystaniu stosunkowo niewielkiej i prognozowalnej liczby danych meteorologicznych, a następnie zastosowanie ich do prognozy jakości powietrza.

## **2. Wykorzystanie numerycznych prognoz pogody do predykcji jakości powietrza**

Eksplloatowane i rozwijane od kilku lat w IMGW-PIB modele numerycznych prognoz pogody – ALADIN i LM-COSMO – dostarczają nie tylko cennych informacji o przewidywanym rozwoju sytuacji meteorologicznej, ale mogą też stanowić doskonale zaplecze do tworzenia produktów pochodnych. Jednym z takich produktów może być prognoza pogody chemicznej. Dostępność wyników numerycznego prognozowania pogody, a także doświadczenia z ich dotychczasowego wykorzystaniem do tego celu skłoniły wykonawców projektu do podjęcia prac nad rozszerzeniem stosowalności modelu prognozy chemicznej opartego na produktach modelu LM-COSMO.

### *Metoda prognozowania*

Nowa idea krótkoterminowej prognozy jakości powietrza polega na rozszerzeniu jej stosowalności na obszar całego kraju przy jednoczesnym ograniczeniu zakresu do zanieczyszczeń pyłowych. Z dotychczasowych badań wynika, że zanieczyszczenie to w warunkach polskich może być identyfikatorem jakości powietrza w chłodnej porze roku, tak więc jego prognoza jest wystarczająca do predykcji zimowych epizodów smogowych. Ze względu na dużą zależność stężeń pyłu zawieszonego od sytuacji meteorologicznej, podstawą modelu krótkoterminowej prognozy jakości powietrza w opisywanej wersji jest numeryczna prognoza pogody LM-COSMO. Model ten, który jest niehydrostatycznym, mezoskalowym modelem meteorologicznym, operacyjnie funkcjonuje w IMGW-PIB.

Idea prognozowania polega na dwuetapowym podejściu do zagadnienia.

W pierwszym etapie określa się stopień potencjalnego zagrożenia epizodami globalnymi i regionalnymi. Wykorzystuje się do tego prognozę LM-COSMO i katalog sytuacji meteorologicznych z lat 2006-2010. Katalog wraz z wartościami parametrów meteorologicznych zawiera prawdopodobieństwo wystąpienia wysokich stężeń. Prognoza LM-COSMO pozwala wyznaczyć każdy z 12 parametrów meteorologicznych. Jeżeli z przeglądu katalogu wynika brak zagrożenia (bardzo małe prawdopodobieństwo przekroczenia wartości progowych), informacja ta jest wystarczająca. Nie podejmuje się żadnych dalszych działań prognostycznych. Jeżeli zaś pierwszy etap wskazuje na możliwość wystąpienia epizodów, to dla obszarów zagrożonych wystąpieniem ponadnormatywnych stężeń pyłu zawieszonego (stężenie o prawdopodobieństwie wystąpienia  $< 0,10$  przekracza założoną wartość

krytyczną: epizod II, III lub IV stopnia) uruchamia się etap drugi, tj. procedurę prognozy opisaną poniżej.

#### *Prognoza eksploracyjna jakości powietrza*

Model prognozy eksploracyjnej jakości powietrza jest oparty na eksploracyjnej analizie danych (*data mining*). Podstawowe założenie tej metody polega na prognozowaniu przebiegów czasowych stężenia danego zanieczyszczenia powietrza przez każdorazowe wyszukiwanie w przeszłości sytuacji podobnych do aktualnej. Efektem wyszukiwania jest kilkadziesiąt możliwych przebiegów czasowych zjawiska (stężenia PM) w najbliższej przyszłości.

Prognozę eksploracyjną można wykonać w wersji skróconej i wersji pełnej.

Minimalne dane potrzebne do wykonania prognozy eksploracyjnej to:

- ciąg pomiarów stężeń zanieczyszczeń oraz w tych samych dobach numeryczne prognozy pogody dla lokalizacji stacji pomiarowej – historyczne prognozy pogody i historyczne dane o jakości powietrza,
- aktualna numeryczna prognoza pogody dla miejsca prognozy sytuacji sanitarnej powietrza.

Wskazane byłoby, aby w danych historycznych znalazły się stężenia z wyróżnionych epizodów smogowych różnych typów. Dla wersji pełnej prognozy potrzebne są jeszcze dane z bliskiej miejscy prognozy stacji meteorologicznej (wymienione wcześniej 12 parametrów meteorologicznych, z okresu dłuższego niż ciąg prognoz historycznych).

Prognozowanie należy podzielić na dwa przypadki w zależności od tego, czy w terenie, dla którego będzie obliczana prognoza:

- A. są lub były prowadzone pomiary stężeń określonego zanieczyszczenia,
- B. nie było żadnych pomiarów.

W przypadku A, jeżeli pomiary są prowadzone operacyjnie, to prognozowanie stężeń zanieczyszczeń może być weryfikowane na bieżąco. W przypadku B należy wytypować stacje pomiarowe umieszczone w podobnym terenie i podobnej strukturze emisji i wykorzystać dane z tych stacji. Podstawowe cechy terenu konieczne do identyfikacji podobieństwa obszaru to: charakterystyka fizycznogeograficzna, zagospodarowanie i użytkowanie terenu, gęstość zaludnienia, charakter warstwy czynnej atmosfery, struktura emisji.

Metodyka prognozowania jest niezależna od rodzaju zanieczyszczenia.

Działaniem poprzedzającym eksplorację danych jest ETL (*Extracting, Transform, Loading*) – przygotowanie danych. W związku z tym, należy stworzyć hurtownię danych (*warehouse*) zawierającą następujące informacje:

- historyczne prognozy pogody z modelu LM-COSMO z wielolecia co najmniej 5-letniego,
- rzeczywiste przebiegi pogody ze stacji meteorologicznych PSHM IMGW-PIB z wielolecia obejmującego większy horyzont czasowy niż prognozy meteorologiczne (pełna wersja prognozy),
- stężenia zanieczyszczeń ze stacji automatycznych państwowego monitoringu środowiska z terminów, w których istnieją historyczne prognozy pogody,

- dane demograficzne, w tym gęstość zaludnienia, i geograficzno-topograficzne, między innymi ukształtowanie (szczególnie dla prognozowania w przypadku B), zagospodarowanie i użytkowanie terenu, poziom antropopresji oraz charakterystyki determinujące rozprzestrzenianie zanieczyszczeń (szorstkość terenu, warunki wentylacyjne warstwy czynnej) itp.,
- warunki emisyjne: emisja punktowa, liniowa, powierzchniowa (szczególnie informacja o niskiej emisji dla prognozowania w warunkach B).

Prognozę eksploracyjną w wersji pełnej można przedstawić w kilku etapach, opisanych poniżej:

**Etap 1. Zdefiniowanie zbioru podobnych prognoz pogody**

Początkiem tego etapu jest aktualna prognoza pogody z modelu LM-COSMO na 78 godzin wprzód licząc od godziny 00 UTC dnia, w którym tworzymy prognozę. W etapie tym są przeglądane prognozy historyczne i wybierane prognozy podobne do aktualnej. Ważna jest data prognozy podobnej. Liczba prognoz podobnych jest parametrem systemu prognozy.

**Etap 2. Zdefiniowanie podzbioru sytuacji meteorologicznych**

Dla dat wybranych w pierwszym etapie jest tworzony podzbiór rzeczywistych sytuacji meteorologicznych obserwowanych na stacji meteorologicznej, położonej jak najbliżej miejsca, dla którego prognozuje się stężenia zanieczyszczeń. Wybór elementów meteorologicznych zależy od prognozowanego zanieczyszczenia.

**Etap 3. Zdefiniowanie liczb rozmytych dla podzbioru sytuacji meteorologicznych**

Wyznaczone w etapie drugim dla każdego elementu oraz każdego terminu ciągu liczbowe potencjalnych wartości należy zregulować. W omawianej metodzie prognozowania zastosowano agregację rozmytą. Ciąg obserwacji meteorologicznych każdego elementu i w każdym terminie jest przekształcony do liczby rozmytej. W wyniku powstaje macierz, której elementy meteorologiczne są liczbami rozmytymi, czyli uzyskuje się rozmyty, uogólniony, spodziewany w najbliższej przyszłości przebieg pogody.

**Etap 4. Wyznaczenie przynależności podzbioru sytuacji meteorologicznych do liczb rozmytych i zdefiniowanie zbioru podobnych sytuacji meteorologicznych**

Przeładowane są wszystkie sytuacje meteorologiczne, dla których są dane o stężeniach zanieczyszczeń. W razie zaobserwowania sytuacji, w której zachodzi założone podobieństwo, dołącza się datę do wynikowego zbioru.

**Etap 5. Zdefiniowanie zbioru podobnych sytuacji sanitarnych powietrza**

Dla dat uzyskanych w trakcie etapu 4 zostaje zapisany obserwowany w tym terminie przebieg czasowy stężeń zanieczyszczeń. W ten sposób uzyskuje się kilkadziesiąt potencjalnych przebiegów stężeń.

**Etap 6. Obliczenie wyjściowych prognoz**

Otrzymane przebiegi są agregowane do jednego o postaci przebiegu czasowego liczb rozmytych. Następnie wszystkie liczby rozmyte są defuzyfikowane i uzyskuje się jeden liczbowy przebieg prognozowanego zjawiska.



Prognoza może być:

- punktowa, dla punktu pomiaru stężeń zanieczyszczeń. Jest ona bardzo łatwa do porównania z rzeczywistymi stężeniami. Jednak ze względu na dużą zmienność pola stężeń zanieczyszczeń trudna do uogólnienia.
- obszarowa (strefowa). Aby było możliwe takie prognozowanie, trzeba skojarzyć warunki demograficzne, emisyjne i topograficzne miejsca prognozowania oraz stacji monitoringowych. Podobne warunki lokalizacji stacji monitoringowej oznaczają podobną imisję na obszarze prognozowania.

W wersji skróconej prognozy eksploracyjnej pomija się etapy 2, 3, 4, 5. Obowiązuje wtedy zasada, że w dni, w których w przeszłości ówczesna prognoza była podobna do aktualnej prognozy pogody, zmierzone wtedy stężenia zanieczyszczeń będą podobne do rzeczywistych w dniu prognozowania eksploracyjnego.

Pojęcie podobieństwa prognoz pogody jest oparte na pojęciu odległości ułamkowej i jest stale doskonalone. Jeśli  $\mathbf{F}_a$  jest prognozą aktualną, a  $\mathbf{F}_h$  prognozą historyczną, przy czym są to macierze o 79 wierszach i 27 kolumnach, to

$$dist(\mathbf{F}_a, \mathbf{F}_h) = \sum_{i=0}^{78} \sum_{j=1}^{27} w_{ij} \cdot \sqrt{|F_a^{ij} - F_h^{ij}|}$$

gdzie  $[w_{ij}]$  jest macierzą wag i wymaga opracowania dla różnych miejsc prognozowania.

Do obliczania podobieństwa są wykorzystywane prognozy przetworzone LM-COSMO. Przetworzenie polega między innymi na:

- przekształceniu kierunku wiatru na wektor wiatru,
- obliczeniu pseudogradientów temperatury: 2 m n.p.g. – przy powierzchni gruntu, 30 – 2 m n.p.g., 850 hPa – 30 m n.p.g.,
- obliczeniu ciśnienia pary wodnej, wilgotności względnej na podstawie temperatury powietrza i temperatury punktu rosy,
- pominięciu danych z powierzchni geopotencjalnych wyższych niż 850 hPa.

#### *Wyniki prognozy jakości powietrza*

Skuteczność prognozowania eksploracyjnego przedstawiono na przykładzie prognozy dla miasta Żywiec w okresie 1 stycznia – 28 lutego 2011 r., przy czym przyjęto:

- okres prognoz historycznych i danych o zanieczyszczeniach 2008-2010 (dostępne pomiary z lat 2006, 2007 są niepełne),
- wersję skróconą prognozy (najbliższa stacja meteorologiczna w Bielsku-Białej znajduje się za pasmem gór Beskidu Śląskiego),
- prognozowanie punktowe w warunkach B, aby sprawdzenie było proste.

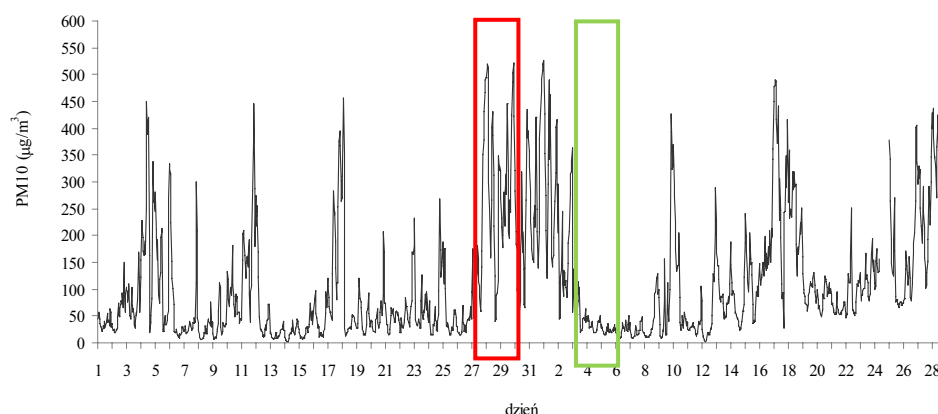
Okres 1 stycznia – 28 lutego 2011 r. w Żywcu charakteryzował się dużą zmiennością stężeń i występowaniem epizodów smogowych, co uwidocznia przebieg godzinowych stężeń PM10 pokazany na rys. 15.

Dla oceny jakości prognozy przyjęto dwie daty 27.01.2011 (termin 1 – epizod smogowy) oraz 03.02.2011 (termin 2 – niskie stężenia).

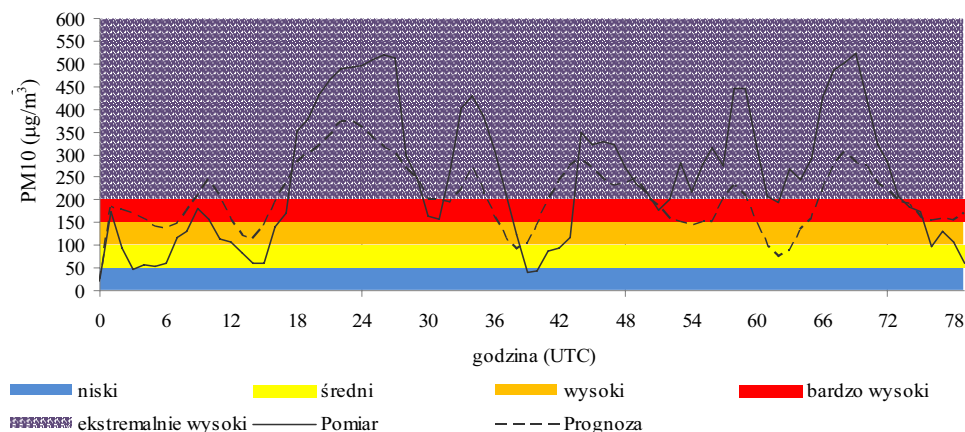
Wykorzystanie katalogu stężeń zanieczyszczeń z wielolecia i odpowiadających im sytuacji meteorologicznych przyniosło wyniki przedstawione w tab. 6.

Tab. 6. Prawdopodobieństwa wystąpienia stężeń PM10 w Żywcu

Data	Prawdopodobieństwo wystąpienia stężeń
27-01-2011	0,892
28-01-2011	0,921
29-01-2011	0,913
03-02-2011	0,082
04-02-2011	0,043
05-02-2011	0,051



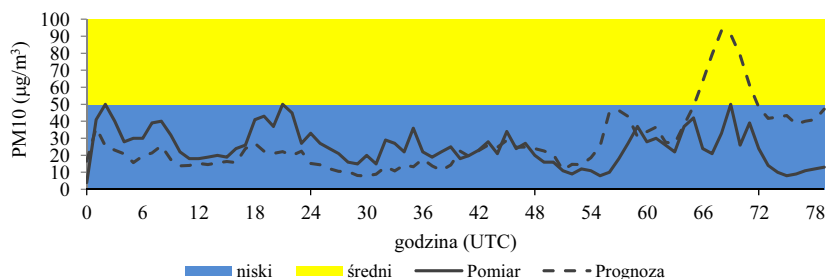
Rys. 15. Przebieg stężenia 1-godzinnego PM10 w styczniu i lutym 2011 roku na stacji PMŚ w Żywcu



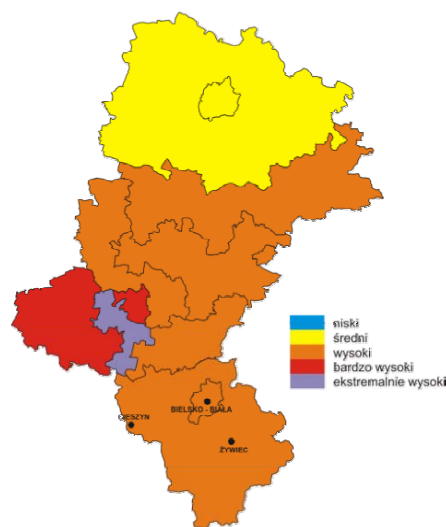
Rys. 16. Pomiar i prognoza stężenia 1-godzinnego PM10 od godz. 00 UTC 27 stycznia 2011 r. na 78 godzin wprzód dla Żywca na tle chwilowego wskaźnika zapylenia PMI

Dla obu terminów obliczono prognozę eksploracyjną PM10. Wyniki jej przedstawiają kolejne dwa wykresy (rys. 16, 17). Jak można zauważyć, jakość prognozy pogarsza się w trzeciej dobie od początku prognozy.

Wizualizacja całościowa krótkoterminowej prognozy stężenia zanieczyszczeń obejmuje zarówno średnie dobowe, jak i maksymalne przebiegi godzinowe poziomu poszczególnych substancji zanieczyszczających powietrze, a także prognozę



Rys. 17. Pomiar i prognoza stężenia 1-godzinnego PM10 od godz. 00 UTC 3 lutego 2011 r. na 78 godzin wprzód dla Żywca na tle chwilowego wskaźnika zapylenia PMI



Rys. 18. Mapa dobowego wskaźnika pyłowego PMI dla stref i aglomeracji województwa śląskiego od godz. 10 UTC 28 stycznia 2011 r. do 10 UTC 29 stycznia 2011 r.

zintegrowanego wskaźnika jakości powietrza – indeksu jakości powietrza. Na rysunku 33 przedstawiono wizualizację prognozy wskaźnika PMI dla stref w województwie śląskim. Strefy określono zgodnie z rozporządzeniem ministra środowiska z 6 marca 2008 r. w sprawie stref, w których dokonuje się oceny jakości powietrza (Dz.U. 2008 Nr 52 poz. 310). W strefie bielsko-żywieckiej zaznaczono stacje PMŚ.

#### Podsumowanie

Proponowana metoda jest jedną z propozycji realizacji krótkoterminowej prognozy stężeń zanieczyszczeń powietrza, przy niepełnej lub braku inwentaryzacji emisji dla danego obszaru.

Obszar badań charakteryzuje się znaczną różnorodnością emisji źródeł zanieczyszczeń. Szczególnie duży udział (ca 60%) ma emisja niezorganizowana, której inwentaryzacja stwarza wiele problemów metodycznych. To ogranicza możliwość stosowania operacyjnie modelowania matematycznego na szeroką skalę przestrzenną i czasową.

Metody eksploracji danych (w tym logika rozmyta) pozwalają na prognozowanie najbliższej przyszłości jedynie na podstawie historii. Ważnym novum jest

odniesienie prognozowanych stężeń zanieczyszczeń do historycznych prognoz pogody, chociaż dokładność prognozy jakości powietrza zależy oczywiście od sprawdzalności numerycznej prognozy pogody.

Opracowany model jakości powietrza funkcjonujący operacyjnie w województwie śląskim od kilku lat, a zaimplementowany dla województwa małopolskiego daje dobrą prognozę dla przebiegu wartości średnich i podwyższonych. W warunkach pogodowych sprzyjających bardzo wysokim stężeniom zanieczyszczeń (np.  $PM_{10} 1h > 200 \mu g/m^3$ ) czasami daje wartości niedoszacowane. Jednym z prawdopodobnych wyjaśnień tego stanu rzeczy jest obserwowana obecnie duża zmienność warunków meteorologicznych, nie mająca odniesienia w historycznych prognozach pogody. Wynika to być może również z intensyfikacji w ostatnich latach tzw. „zjawisk ekstremalnych” (może spowodowanych zmianami klimatu) oraz powstaniem stosunkowo niedawno możliwości ich detekcji i prognozowania.

Model jakości powietrza oparty na metodzie eksploracji danych daje stosunkowo dokładne prognozy i dlatego jego stosowanie dla potrzeb operacyjnych jest ekonomicznie bardziej uzasadnione niż stosowanie drogich i czasochłonnych obliczeń za pomocą modeli stricte matematycznych.

Krótkoterminowa prognoza stężeń zanieczyszczeń realizowana metodą eksploracji danych uzupełnia dotychczas szeroko stosowane metody fizyczne. Jako metoda wykorzystująca głównie informację pomiarową nie wymaga przeprowadzenia inwentaryzacji emisji, żmudnej i niezwykle trudnej w obszarach o dużej koncentracji emisji nieorganizowanej, a następnie wykorzystywania skomplikowanych modeli dyspersyjnych. Zastosowanie w zaprezentowanym procesie prognozowania algorytmów samouczenia się sieci pozwala na dostosowywanie mechanizmów modelowania do zmieniających się danych wejściowych. Metoda ta charakteryzuje się także dużą skutecznością prognozowania i może być łatwo stosowana w systemach informacji społecznej.

Praktyczne wdrożenie działań krótkoterminowych w zakresie informowania społeczeństwa o niekorzystnych warunkach sanitarnych powietrza i ostrzegania przed nimi, ze względów ekonomicznych (analizy kosztów i zysków) powinno się opierać na dwustopniowym systemie prognoz jakości powietrza.

Model eksploracyjnej analizy danych, szybko działający i nie wymagający specjalnych mocy obliczeniowych, może służyć do bieżącej prognozy „natychmiastowej” *ad hoc* jakości powietrza w strefach i aglomeracjach oraz identyfikacji obszarów narażonych na wystąpienie stężeń ponadnormatywnych. W przypadku, gdy prognoza eksploracyjna wykaże duże prawdopodobieństwo wysokich poziomów stężeń zanieczyszczeń powietrza, konieczne staje się wykonanie obliczeń przy wykorzystaniu modeli fizycznych czy matematycznych. I dopiero, gdy wyniki modelowania potwierdzą prognozę eksploracyjną, należałoby podejmować działania krótkoterminowe. Proponowany system hybrydowy krótkoterminowej prognozy jakości powietrza, opierający się na dwóch komplementarnych metodach modelowania, jest rozwinięciem dotychczasowych rozwiązań opartych tylko na jednym modelu (woj. małopolskie, śląskie, pomorskie).

## Literatura

- Araya S.P., 1999, Air pollution meteorology and dispersion, Oxford University Press, New York
- Baklanov A., 2010, Chemical weather forecasting: a new concept of integrated modeling. *Adv. Sci. Res.*, 4, 23–27
- Baklanov A., Grimmond S., Mahura A., Athanassiadou M. (eds.), 2009, *Metrological and Air Quality Models for Urban Areas*, Springer, New York
- Beyer K., Goldstein J., Ramakrishnan R., Shaft U., 1999, When is “Nearest Neighbor” meaningful? In: *Proc. of the International Conference on Database Theory (ICDT). Lecture notes in computer science (Vol. 1540, pp. 217–235)*. Jerusalem, Israel: Springer
- Blažek Z. i in. (w tym Krajny E., Ośródk L.), 2010, Smogová situace v oblasti Ostravsko-Karvinska ve dnech 23-27. ledna 2010. *Meteorologické Zprávy (Meteorological Bulletin)*, ČHMÚ (Czech Hydrometeorological Institute), Ročník 63, číslo 2, 33-41
- Dyrektywa 2008/50/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszeo powietrza dla Europy (CAFE)
- GIOŚ, 2008, Analiza stanu zanieczyszczenia powietrza pyłem PM10 i PM2,5 z uwzględnieniem składu chemicznego pyłu, w tym metali ciężkich i WWA. Raport końcowy. ([http://www.gios.gov.pl/zalaczniki/artykuly/analiza\\_stanu\\_zanieczyszczenia\\_PM10\\_2\\_5.pdf](http://www.gios.gov.pl/zalaczniki/artykuly/analiza_stanu_zanieczyszczenia_PM10_2_5.pdf))
- GIOŚ, 2011, Analiza stanu zanieczyszczenia powietrza pyłem PM10 i PM2,5 z uwzględnieniem składu chemicznego pyłu oraz wpływu źródeł naturalnych. Raport końcowy. ([http://www.gios.gov.pl/zalaczniki/artykuly/raport\\_syntetyczny.pdf](http://www.gios.gov.pl/zalaczniki/artykuly/raport_syntetyczny.pdf))
- Kamiński J.W. i in. (w tym Strużewska J., Jarosz J.), 2008, GEM-AQ, an on-line global multiscale chemical weather modelling system: model description and evaluation of gas phase chemistry processes. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 3255-3281
- Kohonen T., 1997, *Self-Organizing Maps*, 2nd ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Lawrence M.G. i in., 2005, *The Chemical Weather Environmental Chemistry* 2, 1, 6-8
- Lorenc H. (red.), 2005, *Atlas klimatu Polski*, IMGW Warszawa
- Lorenc H. i in., 2012. *Kłęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju*, pod red. H. Lorenc. IMGW-PIB Warszawa
- Markiewicz M., 2004, *Podstawy modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
- Ośródk L., Krajny E., Wojtylak M., 2008, Short-range forecast of heath resort for example Ustron. *Proc. 18<sup>th</sup> International Congress of Biometeorology (ICB2008)*, Tokyo, Japan, 4
- Ośródk L., Krajny E., Wojtylak M., 2010a, Application of fuzzy sets to short-range forecast o fair quality in the regional scale. *Proc. 15<sup>th</sup> IUAPPA World Clean Air Congress*, 2010 Vancouver, Canada
- Ośródk L., Krajny E., Wojtylak M., 2010b, Odtwarzanie scenariuszy potencjalnych sytuacji z wysokimi stężeniami PM przy wykorzystaniu analizy wielowymiarowej. W: *Ochrona powietrza w teorii i praktyce*, pod red. J. Koniecznyńskiego. VII Konferencja Naukowa, Zabrze, Tom II, 231-243
- Ośródk L., Wojtylak M., Krajny E., Klejnowski K., 2008, Propozycja metody szacowania stężenia PM2,5 na podstawie pomiarów PM10 dla potrzeb krótkoterminowej prognozy jakości powietrza w Aglomeracji Górnośląskiej. W: *Ochrona powietrza w teorii i praktyce*, pod red. J. Koniecznyńskiego. VI Konferencja Naukowa, Zabrze, Tom II, 103-113
- Sammon J.W., 1969, A nonlinear mapping for data structure analysis. *IEEE Transactions on Computers*, C-18, 401-409 (May)
- Ustrnul Z., Czekierda D., 2009, *Atlas ekstremalnych zjawisk meteorologicznych oraz sytuacji synoptycznych w Polsce*. IMGW Warszawa

# **Frakcja drobnych cząstek aerozolu atmosferycznego – możliwości monitorowania, ocena zagrożeń na podstawie badań eksperymentalnych**

*Krzysztof Klejnowski, Leszek Ośródk, Ewa Krajny, Wioletta Rogula-Kozłowska, Barbara Błaszczak, Jadwiga Błaszczak, Andrzej Krasa, Patrycja Rogula-Kopiec, Marek Wojtylak*

## **Wprowadzenie**

Mimo znaczących postępów w redukcji emisji zanieczyszczeń z sektora przemysłowego i komunalnego oraz zaostrzenia norm emisji dla pojazdów, zanieczyszczenie pyłowe powietrza jest uznawane za jedno z poważniejszych zagrożeń środowiskowych XXI wieku [EMEP 2009-2011, CLRTAP 1979]. Pył zawieszony (PM – *particulate matter*), często nazywany również aerozolem atmosferycznym, to mieszanina związków stałych i/lub w roztworze wodnym, które są emitowane do powietrza zarówno ze źródeł naturalnych, jak i antropogenicznych. Wielu autorów [np. Laj i in. 2009 i odnośniki tam zawarte] podaje, że cząstki aerozolu odgrywają zasadniczą rolę w procesach atmosferycznych, a wyzwaniem jest charakterystyka składu chemicznego PM i pomiary kluczowych właściwości fizycznych tego złożonego układu wielofazowego [Held i in. 2008, Rodríguez i in. 2008]. Wśród tych ostatnich należy wymienić stężenie liczbowe, masę, pole powierzchni, gęstość, a także własności optyczne i higroskopijność [McMurry 2000].

Krytyczną cechą charakterystyczną cząstek fazy rozproszonej aerozoli jest ich wielkość, wyrażana zazwyczaj jako średnica równoważna (najczęściej aerodynamiczna,  $d_{ae}$ ) [Hinds 1998], od niej bowiem zależą wszystkie właściwości cząstki, w tym jej oddziaływanie na organizm ludzki. Ważny jest zatem rozkład liczby lub masy cząstek poszczególnych rozmiarów [McMurry 2000]. W powietrzu atmosferycznym, w każdym punkcie obserwacji, mogą wystąpić cząstki o  $d_{ae}$  z całego przedziału od  $10^{-3}$  do  $100 \mu\text{m}$  [Seinfeld, Pandit 1998], tj. przedziału fazy rozproszonej aerozolu atmosferycznego (TSP – *Total Suspended Particulates*).

W praktyce zarządzania jakością powietrza uwaga koncentrowała się przede wszystkim na następujących frakcjach: PM<sub>2,5</sub> (pył drobny), PM<sub>2,5-10</sub> (pył gruby) oraz PM<sub>10</sub> (suma PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>2,5-10</sub>). Jednak badania epidemiologiczne przeprowadzone w ostatnich latach [Pope, Dockery 2006; Englert 2004] podkreśliły rolę cząstek submikronowych ( $d_{ae} < 1 \mu\text{m}$ , PM<sub>1</sub>) w wywoływaniu szkodliwych skutków zdrowotnych. Za szczególnie niebezpieczne uznaje się zwłaszcza cząstki o  $d_{ae} < 100 \text{ nm}$ , które mogą wnikać w najgłębsze rejony płuc i przenikać do krwioobrotu [Morawska i in. 2009, Simonet, Valcárcel 2009; Peters i in. 1997]. W odniesieniu do cząstek o nanometrowych rozmiarach do 100 nm jest używane określenie cząstki ultradrobne (UFPs – *ultrafine particles*) [Morawska i in. 2009]. Dotychczasowe badania wskazują, że najistotniejszym źródłem nanocząstek są procesy spalania naturalne i związane z działalnością ludzi; te ostatnie obejmują emisje przemysłowe i komunikacyjne [Resenbohm i in. 2005], spalanie biomasy, palenie tytoniu (tab. 1). Kolejnym ważnym źródłem są procesy konwersji gaz-cząstka, prowadzące do powstania aerozolu wtórnego [Morawska i in. 2009; Lin, Lee 2003].

Tab. 1. Typowe stężenia liczbowe cząstek w różnych środowiskach [Kumar i in. 2010]

Typ środowiska	Typowy zakres stężenia liczbowego (#/cm <sup>3</sup> )
Spaliny samochodowe	10 <sup>4</sup> –10 <sup>7</sup>
Miejski kanion uliczny	10 <sup>4</sup> –10 <sup>6</sup>
Tereny leśne, stepowe, pustynne, pozamiejskie (lub tło miejskie)	10 <sup>3</sup> –10 <sup>4</sup>
Tereny morskie, polarne, wolna troposfera	10 <sup>2</sup> –10 <sup>3</sup>

Należy zwrócić uwagę, że rozkład masy pyłu względem wielkości cząstek ma charakter modalny. Oznacza to, że gęstość tego rozkładu ma kilka maksimumów, z których każde traktuje się jako dominantę (modę) rozkładu osobnej, niezależnej populacji cząstek [Kumar i in. 2010; Seinfeld, Pandis 2006; Hinds 1999]. I tak rozróżnia się:

- modę nukleacji obejmującą cząstki powstające w atmosferze w procesie nukleacji (konwersja gaz-cząstka), o rozmiarach 1-30 nm (lub 1-100 nm wg wielu autorów). Większość z tych cząstek to siarczany, azotany i związki organiczne. Cząstki mody nukleacji stwierdzano w wysokich stężeniach w pobliżu źródeł emisji. Czas ich życia w atmosferze jest stosunkowo krótki;
- modę Aitkena, pokrywającą się z modą nukleacji i akumulacji, najczęściej podawany zakres rozmiaru jej cząstek to 20-100 nm. Moda ta nie jest wyraźnie dostrzegalna w wielu pomiarach atmosferycznych, ale może być wyróżniona z zastosowaniem analizy statystycznej. Cząstki tej mody powstają w wyniku wzrostu lub koagulacji cząstek mody enukleacji, a także w wielu pierwotnych źródłach spalania, takich jak pojazdy;
- modę akumulacji, której cząstki (rozmiar 30-300 lub 100-300 nm) są aglomeratami węglowymi (sadzy i/lub popiołu). Pochodzą głównie ze spalania paliwa silnikowego lub oleju smarowego w pojazdach samochodowych oraz przez koagulację cząstek mody nukleacji. Mają stosunkowo długi czas życia w atmosferze (zazwyczaj dni do tygodni) i dlatego mogą być przenoszone na da-

lekie odległości w atmosferze. Co ważniejsze, cząstki tej mody mają rozmiary porównywalne z długością fali światła widzialnego, a zatem są w znacznym stopniu odpowiedzialne za ograniczenie widzialności na obszarach miejskich.

Dokładna ocena zagrożeń środowiskowych powodowanych przez ultradrobne cząstki wymaga użycia efektywnych ilościowych metod analitycznych [Simonet, Valcárcel 2009]. Zapotrzebowanie na metody instrumentalne mające temu służyć doprowadziło do znacznego rozwoju konstrukcyjnego aparatury i wyprodukowania przyrządów o krótkim czasie odpowiedzi, niezbędnym do wykrywania pojedynczych nanocząstek i charakterystyki ich właściwości [Wehner i in. 2007]. Istnieje bardzo wiele przyrządów do monitorowania rozkładu ziarnowego cząstek ultradrobnych w powietrzu [Justino i in. 2011, Kumar i in. 2010, Laj i in. 2009, Morawska i in. 2009, Simonet, Valcárcel 2009, Held i in. 2008, Keskinen i in. 1992]:. Do najważniejszych i najpowszechniej stosowanych należy zaliczyć

- kondensacyjne liczniki cząstek (*Condensation Particle Counters – CPC*);
- DMPS (*Differential Mobility Particle Sizer*) i SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*);
- APS (*Aerodynamic Particle Sizer*);
- ELPI (*Electrical Low Pressure Impactor*);
- UFP (*Ultrafine Particle Monitor*).

Wielu autorów sugeruje, że w kontekście oceny skutków zdrowotnych cząstek ultradrobnych większe znaczenie mają badania stężenia liczbowego niż stężenia masowego [McMurry 2000, Oberdörster i in. 1995]. Dodatkowo pomiary liczebności cząstek oraz ich rozkładu znajdują zastosowanie w badaniach dotyczących ograniczenia widzialności, tworzenia mgieł, fizyki chmur oraz w badaniach związanych z bilansem radiacyjnym [Laj i in. 2009 i odnośniki w nim zawarte].

Ponieważ stężenia cząstek i ich składy ziarnowe są bardzo zmienne w czasie i przestrzeni, wskazane jest prowadzenie pomiarów ciągłych na wielu różnych stanowiskach, zwłaszcza w gęsto zaludnionych obszarach miejskich, narażonych na wysokie poziomy PM w powietrzu [Vester i in. 2007; Mejía 2008 Simonet i Valcárcel 2009; Justino i in. 2011; Kulmala i in. 2011 i odnośniki w nim zawarte].

Prowadzone w ramach projektu KLIMAT badania składu ziarnowego i składu fizykochemicznego aerozoli atmosferycznych są więc w pełni zasadne tym bardziej, że mogą pomóc w zrozumieniu i prognozowaniu zmian klimatu oraz opracowaniu i wprowadzeniu przyszłych strategii i planów dotyczących monitoringu jakości powietrza.

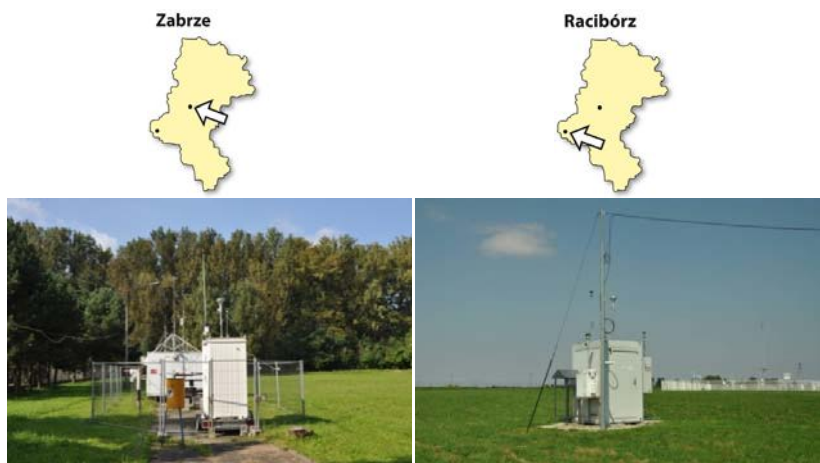
## **1. Metody monitorowania frakcji pyłu drobnego, wyposażenie stacji badań w Zabrze i w Raciborzu oraz program pomiarowy**

Mając na uwadze uwarunkowania techniczne i dostępność sprzętu pomiarowego do prowadzenia ciągłych badań, w ramach projektu KLIMAT utworzono dwie stacje pomiarowe do monitorowania drobnych cząstek aerozolu atmosferycz-

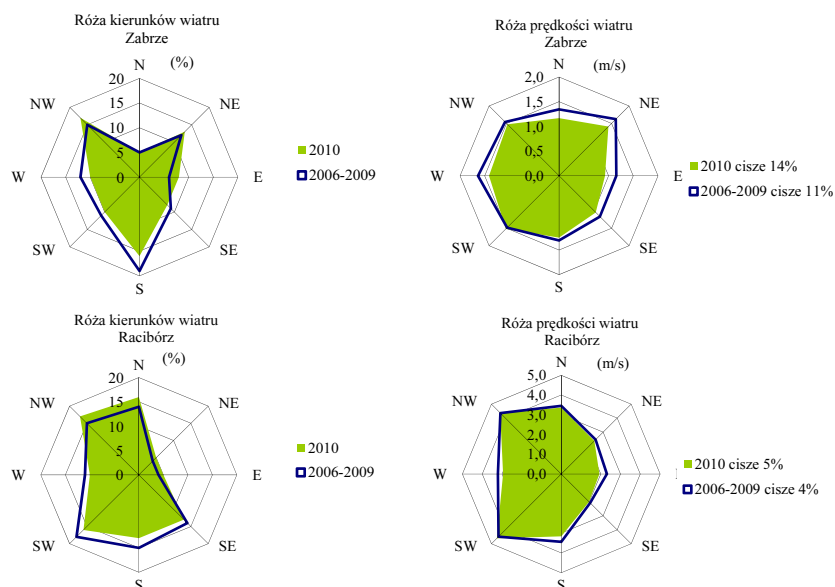


nego w województwie śląskim (rys. 1). Jedna znajduje się w Zabrze (50°19'00''N, 18°46'21''E) w obszarze tła miejskiego Aglomeracji Górnośląskiej. Druga została utworzona w Raciborzu (50°03'42''N, 18°11'30''E) w obszarze tła regionalnego.

Różne prędkości i kierunki wiatru w obu obszarach pomiarowych zaprezentowano na rys. 2.



Rys. 1. Lokalizacja stanowisk pomiarowych badań aerozoli (fot. K. Klejnowski)



Rys. 2. Różnice kierunków i prędkości wiatru w Zabrze i w Raciborzu w roku 2010 na tle wielolecia 2006-2009

#### Charakterystyka fizjograficzna rejonu stacji pomiaru jakości powietrza w Zabrze

Stacja jest położona w makroregionie fizyczno-geograficznym Wyżyna Śląska, w obrębie mezoregionu Wyżyna Katowicka, na wysokości 256 m n.p.m.

[Kondracki 2009]. Ta część Wyżyny Katowickiej jest nazywana Płaskowyżem Bytomsko-Katowickim, cechującym się wzniesieniami o spłaszczonych zaokrąglonych wierzchołkach, zbudowanych na odpornych piaskowcach i innych skałach karbońskiego podłoża. W obrębie jednego z takich wzniesień jest położona stacja pomiarowa w Zabrze, a teren opada łagodnie na południowy zachód w stronę doliny Kłodnicy, która w rejonie Gliwic znajduje się już w Kotlinie Raciborskiej. Znajduje się ona na terenie posesji Instytutu Podstaw Inżynierii Środowiska PAN w odległości ok. 1,7 km na północny zachód od centrum miasta.

#### *Charakterystyka fizjograficzna rejonu stacji pomiaru jakości powietrza w Raciborzu*

Stacja pomiarowa w Raciborzu jest położona w makroregionie fizyczno-geograficznym Nizina Śląska, pomiędzy jej najbardziej na południowy wschód wysuniętymi mezoregionami, na wysokości 206 m n.p.m. Kotliną Raciborską a Płaskowyżem Głubczyckim [Kondracki 2009]. Rzeźba terenu wykazuje przejściowy charakter między rzeźbą niziną a wyżyną. Kotlina Raciborska jest tektonicznym zapadliskiem przedkarpackim wypełnionym ilami i piaskami, której środkiem biegnie koryto górnej Odry w przedziale wysokości 180-185 m n.p.m. Prostoliniyny przebieg tego koryta na osi NNW-SSE nawiązuje do przebiegu rowu tektonicznego. W szerokim na 4-5 km dnie doliny Odry oraz na obu jej zboczach występuje kilka poziomów terasowych. Wzdłuż zachodniego zbocza doliny Odry przebiega równoległe do głównego nurtu tej rzeki rodzaj małej młynówki, zwanej Psinką.

Stacja pomiaru jakości powietrza w Raciborzu-Studziennej znajduje się na terenie stacji hydrologiczno-meteorologicznej I rzędu IMGW-PIB, w odległości ok. 200 m od ogródka meteorologicznego w kierunku SW, a w odległości ok. 4 km na południowy zachód od śródmieścia Raciborza. Od strony wschodniej do stacji przylega pas podmiejskiej zabudowy południowej części dzielnicy Studzienna. Pas tej zabudowy ciągnie się wzdłuż drogi wylotowej z Raciborza do Chałupek. Od strony zachodniej rozpościera się otwarta szeroka przestrzeń użytków rolnych, ciągnąca się w kierunku gminy Krzanowice. Z kolei od strony południowej początkowo otwarte tereny rolnicze zamyka w odległości 0,8 km podmiejska zabudowa Sudołu, tj. następnej dzielnicy Raciborza, odległej o ok. 5 km od centrum miasta.

#### *Program pomiarowy badań aerozolu atmosferycznego*

Podstawowy zakres pomiarowy obu stacji badań aerozoli obejmował:

- pomiar stężenia liczbowego cząstek ultradrobnych,
- pomiar parametrów optycznych atmosfery,
- pobór pyłu PM<sub>1</sub> do badań składu chemicznego.

Do pomiaru tych parametrów i pomiaru parametrów dodatkowych niezbędnych do interpretacji uzyskanych wyników stacje wyposażono w rozbudowane zestawy aparatury (tab. 2).

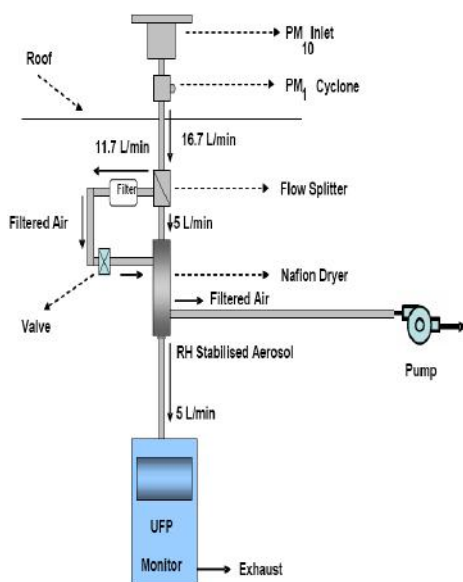
Pomiary stężenia liczbowego cząstek aerozolu (nazywanego także liczebnością) i rozpraszania światła w zakresie 3 długości fal prowadzono przez cały rok 2010 w sposób ciągły, w cyklach wynikających z czasu uśredniania danego aparatu-

tu. Próbkę do badań składu chemicznego PM1 pobierano w cyklach dobowych w okresie 01.08-31.12.2009 w Zabrze i w okresie 01.08-31.12.2010 w Raciborzu.

Badania towarzyszące kampanii podstawowej obejmowały w Zabrze ciągły pomiar stężeń PM<sub>2,5</sub> miernikiem automatycznym (TEOM 1200a), ciągły pomiar stężeń sadzy (BC – *Black Carbon*) związanej z pyłem drobnym PM<sub>2,5</sub> (MAAP 5012) oraz okresowy pomiar stężenia liczbowego i masowego 13 frakcji PM z wykorzystaniem impaktora elektrycznego ELPI.

Tab. 2. Wyposażenie stacji badań aerozoli w Raciborzu i w Zabrze

Przyrząd	Monitor cząstek ultrarobnych	Impaktor	Miernik stężenia PM	Spektrometr	Nefelometr integrujący	Monitor sadzy	Pobornik PM
Rodzaj pomiaru	Stężenie liczbowe	Stężenie liczbowe i masowe	Stężenie masowe	Stężenie liczbowe i masowe	Rozpraszanie światła w 3 zakresach długości fal	Stężenie masowe sadzy	Stężenie masowe
<i>Przedział wielkości cząstek aerozolu</i>							
Frakcja PM (µm)	0,02-1	0,03-40	1-10	0,37-20	-	≤ 2,5	≤ 1
<i>Stacja pomiarowa</i>							
Racibórz IMGW-PIB	Ultra Fine Particle Monitor UFP Model TSI 3031-1	-	Dust Track DRX	Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer APS TSI	Aurora Model 3000	-	Dichotomus Partisol Plus 2020
Zabrze IPIŚ PAN	Ultra Fine Particle Monitor UFP Model TSI 3031	Electrical Low Pressure Impactor DEKATI	TEOM 1200a Impactor Dekati	-	TSI Model 3563	MAAP 5012	Dichotomus Partisol Plus 2020



Rys. 3. Schemat układu poboru próbek (źródło: TSI), miernik TSI UFP 3031-1 w stacji badań aerozoli w Raciborzu (fot. K. Klejnowski)

W Raciborzu badania uzupełniające obejmowały ciągły pomiar stężenia trzech frakcji pyłu: PM1, PM2,5 i PM10 z wykorzystaniem miernika optycznego TSI DustTrack i ciągły pomiar liczebności cząstek w zakresie 0,37-20  $\mu\text{m}$  z wykorzystaniem spektrometru optycznego APS.

Wykorzystywany w badaniach monitor cząstek ultradrobnych TSI UFP, w tej pracy nazywany też licznikiem ziaren (rys. 3), mierzy skład ziarnowy i stężenie liczbowe cząstek w przedziale 20-1000 nm, dane są gromadzone w 6 kanałach. Wyniki pomiarów stężenia dla każdego kanału są podawane co ok. 15 minut. Sterowanie i zbieranie wyników jest zdalne za pomocą łącza internetowego. Zasada działania monitora oparta jest na dyfuzyjnym ładowaniu cząstek, za którym podąża segregacja rozmiarowa, w zakresie *Differential Mobility Analyzer* (DMA), oraz detekcja aerozolu za pomocą czułego elektrometru. Przyrząd działa w trybie ciągłym 24-godzinnym. Licznik ma specjalny układ do poboru próbek środowiskowych (TSI 3031200) zapewniający reprezentatywny pobór próbek i ich odpowiednie kondycjonowanie przez zastosowanie osuszacza nefionowego.

## **2. Wpływ aerozoli na parametry optyczne atmosfery – pomiary nefelometryczne**

Jednym z efektów zmienności klimatu jest wzrost temperatury powietrza, będący wynikiem nie tylko efektu cieplarnianego, ale również „czystszej” atmosfery. Konsekwencją rewolucji przemysłowej rozpoczętej w połowie lat 50. ubiegłego wieku była intensywna emisja do atmosfery różnych związków chemicznych, w tym szczególnie pyłowych, tworzących w powietrzu aerozole, które powodowały osłabienie docierającego promieniowania słonecznego do powierzchni Ziemi. Mimo, że zjawisko to do lat 70. było intensywne i choć równocześnie do powietrza trafiało coraz więcej gazów cieplarnianych, nie obserwowano bezpośrednich skutków ocieplania się klimatu. Efekt cieplarniany postępował, „ale nie robiło się od tego cieplej”, ponieważ do powierzchni Ziemi docierało coraz mniej światła słonecznego. Zjawisko to określono mianem „zaciemnienia”.

Od lat 80. XX wieku na skutek zmian w sektorze gospodarki przemysłowej, szczególnie krajów europejskich, stopniowo zmniejszała się emisja zanieczyszczeń i atmosfera stawała się coraz przejrzystsza. Jednak dopiero w latach 90. powstała pierwsza jednorodna globalna sieć pomiarów radiometrycznych BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*). W analizach zaczęto także wykorzystywać wyniki pomiarów satelitarnych.

Obecnie powszechnie wiadomo, że część światła słonecznego jest zatrzymywana przez zanieczyszczone powietrze (sadzą, aerozolami). Z jednej strony aerozole w powietrzu przyczyniają się również do powstawania chmur składających się z kropelek zbyt małych, aby mogły powodować opad atmosferyczny, a z drugiej – chmury ograniczają dopływ bezpośredniego promieniowania słonecznego do powierzchni Ziemi. Na skutek tego zjawiska klimat w przyszłości może być cieplejszy i bardziej suchy. Od początku lat 90. w wyniku polepszenia się jakości powietrza, a więc i zwiększenia przezroczystości atmosfery zaobserwowano stosunkowo

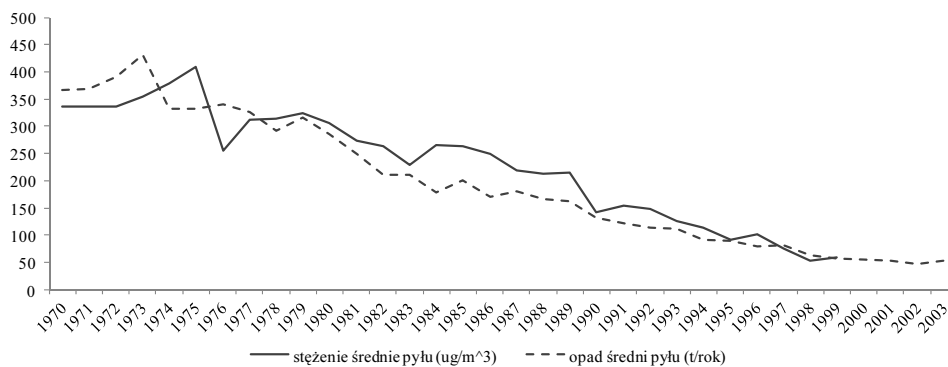
szybki wzrost temperatury powietrza. Zatem zanieczyszczone powietrze negatywnie wpływa na faunę i florę na Ziemi, ale stanowi przeciwwagę dla efektu cieplarnianego.

Na podstawie pomiarów grubości optycznej aerozoli oraz natężenia promieniowania słonecznego na kilku stanowiskach pomiarowych w Europie oszacowano, że za wzrost temperatury powietrza w ok. 50% odpowiada zmniejszenie się ilości aerozoli w powietrzu [Ruckstuhl i in. 2008]. Według innych badaczy znaczenie tego zjawiska w ocieplaniu się klimatu jest znacznie mniejsze [Makowski i in. 2008]. Jednym z przejawów rozjaśnienia się atmosfery jest stopniowe zwiększanie się dobowej amplitudy temperatury [Makowski i in. 2008]. Analiza wyników pomiarów z wybranych stacji meteorologicznych wykazała, że w badanym wieloleciu dobowa temperatura maksymalna wykazywała tendencję dodatnią, przy czym najbardziej zauważalne były zmiany w maju i listopadzie.

Obserwuje się również zmniejszenie liczby dni z mgłą czy zamgleniem [Vautard i in. 2009] oraz zwiększenie udziału obserwacji widzialności powyżej kilkudziesięciu kilometrów. Analiza danych ze stacji meteorologicznych wykazała, że od roku 1991 obserwuje się sukcesywny wzrost udziału procentowego obserwacji widzialności powyżej 20 km, który obecnie wynosi ok. 40%.

Tak więc zmniejszenie poziomu emisji zanieczyszczeń do atmosfery ujawniło rozmiary postępującego efektu zmian klimatu. Obecnie notowane poziomy stężenie zanieczyszczeń pyłowych wciąż jednak stanowią problem ekologiczny i niekorzystnie oddziałują na środowisko i zdrowie ludzi.

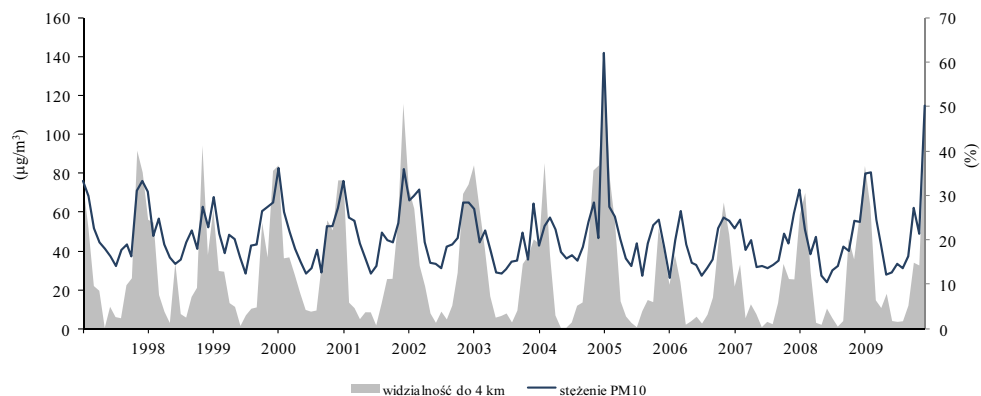
Celem badań była ocena możliwości wykorzystania nefelometru do identyfikacji źródeł osłabienia widzialności atmosferycznej, w szczególności wpływu zanieczyszczeń pyłowych na rozpraszanie optyczne atmosfery.



Rys. 4. Średnie roczne stężenie pyłu i opad pyłu w Aglomeracji Górnośląskiej w latach 1970-2003

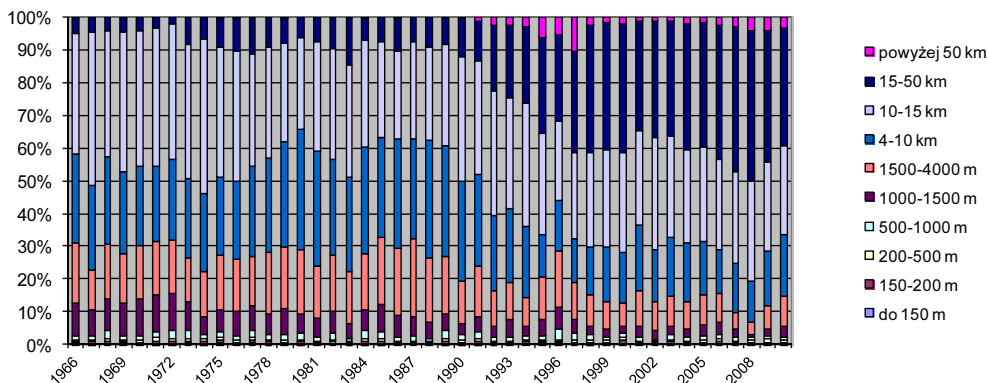
Obecność zanieczyszczeń pyłowych w atmosferze, poza niewątpliwym wpływem na przebiegu różnych elementów meteorologicznych, a co za tym idzie i na zmiany klimatu, wpływa na widzialność. Silne zmniejszenie widzialności jest jednym ze skutków występowania epizodów smogowych. Zanieczyszczenie tego typu w obszarach o dużej emisji przemysłowej, komunikacyjnej i komunalnej istotnie wpływa również na charakterystyki roczne widzialności (rys. 4).

Przykładem tego jest widoczna na rys. 5 zależność między stężeniem pyłu PM10 a odsetkiem obserwacji meteorologicznych z widzialnością do 4 km.



Rys. 5. Stężenie miesięczne średnioobszarowe PM10 w Aglomeracji Górnośląskiej w latach 1998-2010 na tle widzialności do 4 km

Wraz ze spadkiem emisji zanieczyszczeń pyłowych, głównie z sektora przemysłowego obserwuje się zwiększanie widzialności. Na przykład w Katowicach do roku 1990 nie obserwowano widzialności powyżej 50 km (rys. 6). W pewnym sensie na podstawie analizy rocznego rozkładu widzialności można wnioskować o poziomie pyłu w atmosferze.



Rys. 6. Widzialność średnioroczna na stacji meteorologicznej Katowice w Aglomeracji Górnośląskiej w latach 1966-2010

Do niedawna obserwacje widzialności poziomej na stacjach meteorologicznych były wykonywane tylko metodą wizualnej oceny meteorologicznego zasięgu optycznego. Zastosowania metod teledetekcyjnych wykorzystujących nefelometrię zmieniło ten stan rzeczy. Od 2000 roku na stacjach meteorologicznych sieci IMGW-PIB widzialność pozioma jest mierzona instrumentalnie, przy wykorzystaniu tzw. zintegrowanego czujnika pogody, co nie tylko polepsza jakość pomiarów, ale i stwarza nowe horyzonty badawcze w zakresie wykorzystania tej metody do pomiarów zapylenia atmosfery.

W ramach projektu KLIMAT pomiary nefelometryczne prowadzono równolegle w dwóch lokalizacjach – w obszarze miejskim (Zabrze) i w obszarze tła (Racibórz) przy wykorzystaniu nefelometrów całkujących. Pomiary te, służąc do identyfikacji źródeł zanieczyszczeń pyłowych w różnych częściach województwa śląskiego, były wykorzystywane także do weryfikacji tezy o możliwości zastosowania zintegrowanego czujnika pogody jako detektora zapylenia atmosfery.

#### *Podstawy teoretyczne pomiarów nefelometrycznych*

Tłumienie światła w atmosferze jest spowodowane zarówno rozpraszaniem, jak i absorpcją. Zanieczyszczenia pyłowe i gazowe lub kryształki lodu (zamarzająca mgła) mogą spowodować, że składnik wyrażający absorpcję jest znaczny. Na ogół jednak współczynnik absorpcji jest nieznaczny, a rozpraszanie spowodowane odbiciem, refrakcją lub dyfrakcją na kropelkach wody stanowi główny czynnik zmniejszający widzialność. Można więc założyć, że współczynnik ekstynkcji jest równy współczynnikowi rozpraszania i używać przyrządy do pomiaru tego drugiego parametru do oceny meteorologicznego zasięgu optycznego MOR (*Meteorological Optical Range*). MOR jest podstawową charakterystyką przejrzystości atmosfery, którą można zmierzyć w obiektywny sposób (WMO 1992).

Zależności matematyczne między meteorologicznym zasięgiem optycznym i różnymi zmiennymi reprezentującymi optyczny stan atmosfery można wyprowadzić przy zastosowaniu praw Koschmiedera i Bouguera-Lamberta-Beera.

Obniżenie natężenia światła (tłumienie światła) jest zazwyczaj wyrażone prawem Bouguera-Lamberta-Beera

$$I = I_0 \cdot e^{-\sigma_{ext}x}$$

gdzie:  $I_0$  – początkowe natężenie światła dla  $x = 0$ ,  $I$  – natężenie światła po przebyciu drogi o długości  $x$ ,  $\sigma_{ext}$  – współczynnik ekstynkcji (osłabienia) będący sumą współczynnika rozpraszania  $\sigma_{scat}$  i absorpcji  $\sigma_{abs}$ :

$$\sigma_{ext} = \sigma_{scat} + \sigma_{abs} = \ln(I/I_0)/x$$

Matematyczna zależność między MOR i współczynnikiem ekstynkcji jest opisana równaniem Koschmiedera:

$$L_v \approx const / \sigma_{ext}$$

przy czym stała (*const*) w zależności od zastosowań jest równa 3 lub 3,912.

Im większy  $\sigma_{ext}$ , tym szybciej światło ulega osłabieniu, tzn. zmniejsza się widzialność. Obiektami odpowiedzialnymi za osłabienie światła w atmosferze mogą być molekuly gazu lub cząstki zanieczyszczeń zawieszonych w powietrzu. Współczynniki rozpraszania i absorpcji mogą być przedstawione w sposób następujący:

$$\sigma_{scat} = \sigma_{sg} + \sigma_{sp}, \quad \sigma_{abs} = \sigma_{ag} + \sigma_{ap}$$

gdzie indeksy dolne oznaczają:  $s$  – rozpraszanie,  $a$  – absorpcję,  $g$  – w odniesieniu do molekuł gazu,  $p$  – w odniesieniu do stałych cząstek zawieszonych (rozpraszanie na molekułach gazu jest również nazywane rozpraszaniem Rayleigha i wówczas współczynnik  $\sigma_{sg}$  jest oznaczany  $\sigma_{rg}$ ).

Najbardziej znaczącym absorbentem gazowym jest  $\text{NO}_2$ , a cząsteczkowym – sadza. Z wyjątkiem sytuacji z wysokimi stężeniami sadzy, wpływ absorpcji jest pomijalny w porównaniu z wpływem rozpraszania, czyli  $\sigma_{sp} > \sigma_{ap}$  lub nawet  $\sigma_{sp} \gg \sigma_{ap}$ . W związku z tym zakłada się, że wartość  $\sigma_{sp}$  dobrze odzwierciedla udział aerozolu w  $\sigma_{ext}$ , a  $\sigma_{ag}$  jest zazwyczaj nieistotny. Dlatego, z bardzo dobrym przybliżeniem można przyjąć:

$$\sigma_{ext} \approx \sigma_{scat} = \sigma_{sg} + \sigma_{sp}$$

Rozróżnia się dwie kategorie przyrządów do pomiaru MOR. Są to:

- Przyrządy mierzące współczynnik ekstynkcji lub współczynnik transmisji w poziomym walcu powietrza. Tłumienie światła jest spowodowane zarówno rozpraszaniem, jak i pochłanianiem światła przez cząstki w powietrzu znajdujące się na ścieżce wiązki światła.
- Przyrządy mierzące współczynnik rozproszenia światła na podstawie niewielkiej objętości powietrza. W przypadku mgły naturalnej absorpcja jest często nieznacząca oraz można przyjąć, że współczynnik rozproszenia jest taki sam jak współczynnik ekstynkcji.

Współczynnikiem mierzonym bezpośrednio przez nefelometr jest  $\sigma_{scat}$ . Wyższe stężenie cząstek w powietrzu powoduje większe rozpraszanie, a więc  $\sigma_{sp}$  jest dobrą miarą zanieczyszczeń cząsteczkowych, czyli również widzialności atmosferycznej. W warunkach miejskich  $\sigma_{sp}$  jest znacznie większe niż  $\sigma_{sg}$ .

Jak wiadomo, absorpcja i rozpraszanie zależą od długości fali elektromagnetycznej. Nefelometr całkujący mierzy współczynnik rozpraszania  $\sigma_{sp}$  światła wykorzystując jako źródło symultanicznie trzy częstotliwości fali z zakresu widma widzialnego. Długość fali determinuje rozpraszanie w zależności od właściwości optycznych aerozoli – rozmiaru i kształtu cząstek, składu chemicznego. I tak:

- fala niebieska silnie oddziałuje z drobnymi i ultradrobnymi cząsteczkami (pożary lasów, spalanie węgla, zanieczyszczenia komunikacyjne),
- fala zielona silnie oddziałuje z cząstkami średnich frakcji (smog, mgła, zamglenie, zmniejszenie widzialności spowodowane przez litometeory jak zmętnienie pyłowe),
- fala czerwona silnie oddziałuje z grubymi frakcjami PM (sól morską, pyłki roślinne, itd.).

Nefelometr znalazł zastosowanie w krótko- i długoterminowych pomiarach współczynnika rozpraszania światła aerozoli atmosferycznych i testowych, szczególnie przydatny jest w badaniach nad klimatem, widzialnością i jakością powietrza, w tym jako:

- wskaźnik poziomu zanieczyszczenia pyłowego PM powietrza,
- miernik przezroczystości atmosfery,
- element monitoringu, w tym wczesnego ostrzegania w przypadku zamieci, wichury, wiru czy burzy pyłowej lub piaskowej oraz pożarów,
- dla pomiaru globalnego ocieplenia, bilansu promieniowania.

Nefelometry są szeroko stosowane w służbie meteorologicznej do pomiaru widzialności. Najczęściej są częścią tzw. zintegrowanego czujnika pogody FD12P



Vaisala, który rejestruje natężenie, rodzaj oraz czas trwania opadu atmosferycznego i określa widzialność na podstawie meteorologicznego zasięgu optycznego [FD12P 1998]. W Polsce według stanu na koniec 2011 roku działały operacyjnie 53 takie czujniki na stacjach meteorologicznych PSHM IMGW-PIB. Długość fali pracy czujnika FD12P wynosi ok. 875 nm. Pomiar widzialności jest oparty na pomiarze rozpraszania pod kątem 45°. Rozpraszanie pod tym kątem nie zależy od rodzaju cząstek, a jedynie od ich ilości. Widzialność określana metodą nefelometryczną jest odwrotnością współczynnika rozpraszania światła.

#### Zakres pomiarowy

Dane pomiarowe z nefelometru analizowano porównując je z wynikami równoległe prowadzonych pomiarów stężenia pyłu zawieszonego na tle warunków meteorologicznych, w tym widzialności. Widzialność pozioma była mierzona za pomocą zintegrowanego czujnika pogody FD12P. Badania te prowadzono w 2010 roku równoległe w Raciborzu i Zabrze, przy czym:

- stacji w Raciborzu była wyposażona w nefelometr Aurora-3000 Ecotech, urządzenia do pomiaru pyłu zawieszonego różnej frakcji, a osłonę meteorologiczną systemu zapewniała stacja PSHM IMGW-PIB;
- stacja w Zabrze dysponowała nefelometrem Model 3563 TSI, urządzeniami do pomiaru pyłu zawieszonego różnej frakcji oraz czujnikami do pomiaru podstawowych elementów meteorologicznych.

Tab. 3. Długość fali elektromagnetycznej pracy nefelometrów i kąt rozpraszania światła

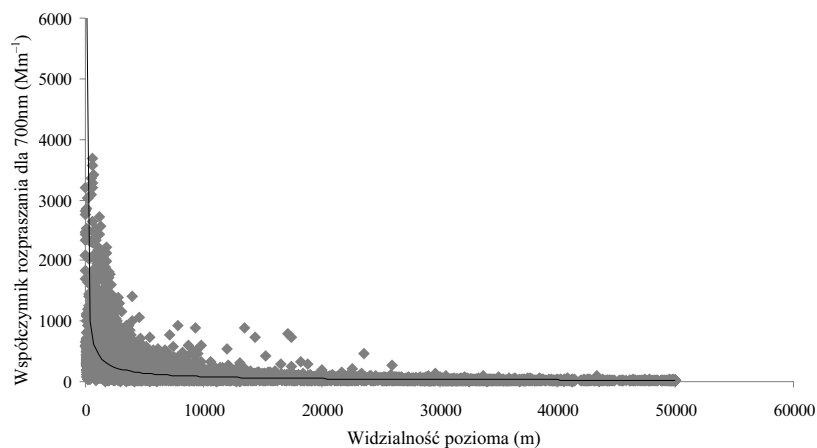
Nefelometr	Długość fali (nm)			Zakres kątowy	
	R(czerwona)	G(zielona)	B(niebieska)	rozpraszanie całkowite	rozpraszanie wsteczne
Aurora-3000	700	520	450	10-170°	90-171°
Model 3563	700	550	450	7-170°	90-170°

#### Wyniki pomiarów właściwości optycznych

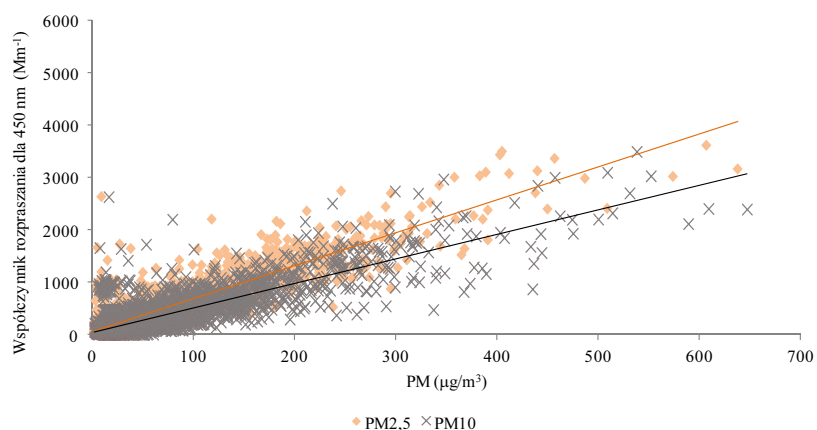
Statystykę wyników pomiarów dla nefelometrów przedstawia tab. 4. Porównywanie wyników pomiarów z dwóch modeli nefelometrów Aurora-3000 Ecotech

Tab. 4. Wybrane statystyki średnich 1-godzinnych współczynników rozpraszania  $\sigma_{sp}$  na stacji w Raciborzu i Zabrze w 2010 roku

Charakterystyka	Współczynnik $\sigma_{sp}$					
	Fala elektromagnetyczna					
	R (czerwona)		G (zielona)		B (niebieska)	
	Racibórz	Zabrze	Racibórz	Zabrze	Racibórz	Zabrze
Liczba danych	6922	7377	6922	7172	6922	7244
Udział ważnych danych (%)	79,0	84,2	79,0	81,9	79,0	82,7
Maksimum (Mm <sup>-1</sup> )	3691,7	2388,3	4833,5	3233,9	5413,1	3609,6
Średnia (Mm <sup>-1</sup> )	203,8	192,1	252,7	271,7	354,4	315,3
Odchylenie standardowe (Mm <sup>-1</sup> )	336,1	239,9	414,8	330,5	504,3	368,6
Percentyl 25 (Mm <sup>-1</sup> )	40,0	53,7	51,2	79,3	91,6	96,6
Mediana (Mm <sup>-1</sup> )	83,2	106,0	106,5	153,6	182,1	189,7
Percentyl 75 (Mm <sup>-1</sup> )	213,6	231,6	265,6	319,6	400,7	376,0



Rys. 7. Zależność między współczynnikiem rozpraszania dla fali 700 nm a widzialnością poziomą dla Raciborza – rok 2010



Rys. 8. Zależność między współczynnikiem rozpraszania dla fali 450 nm a stężeniem pyłu zawieszonego PM dla Zabrze – rok 2010

i Model 3563 TSI było możliwe, ze względu na podobne założenia konstrukcyjne i charakterystyki pracy tych urządzeń [Müller i in. 2011].

Analiza porównawcza współczynnika rozpraszania  $\sigma_{sp}$  dla Raciborza i Zabrze wykazała, że jego wartości średnie w obu punktach pomiarowych zawierały się w podobnych przedziałach – od kilku do kilkuset  $Mm^{-1}$ . Natomiast wartości bezwzględne nieco większe zarejestrowano w Raciborzu.

Współczynnik korelacji między współczynnikiem rozpraszania  $\sigma_{sp}$  a widzialnością poziomą wyznaczoną czujnikiem FD12P dla Raciborza dla rocznej serii pomiarowej wyniósł dla fali niebieskiej, zielonej i czerwonej odpowiednio 0,7567, 0,7701, 0,7706. Wskazuje to na dobre dopasowanie tych wielkości fizycznych.

Na wartość współczynnika rozpraszania, obok cząstek pary wodnej, istotnie wpływają stałe cząstki. Przykładowo na rys. 8 przedstawiono związek między stę-

żeniem pyłu PM10 i PM2,5 mierzonym metodą grawimetryczną a współczynnikiem rozpraszania dla stacji w Zabrze.

Tab. 5. Współczynniki korelacji między 1-godzinnym stężeniem PM10 i PM2,5 a współczynnikiem rozpraszania  $\sigma_{sp}$  dla Zabrze w roku 2010

Długość fali (nm)		450	550	700
Współczynnik korelacji	PM10	0,8284	0,7891	0,7531
	PM2,5	0,9019	0,8775	0,8508

Współczynnik hemisferycznego rozpraszania z nefelometru uwarunkowany jest poziomem promieniowania słonecznego, które zależy od składu chemicznego powietrza. Współczynnik korelacji między stężeniem pyłu a współczynnikiem rozpraszania światła dla Zabrze przedstawiono w tab. 5. Silną zależność statystyczną między tymi dwiema wielkościami fizycznymi potwierdziły również pomiary w Raciborzu zarówno w przebiegu rocznym, jak i sezonowym.

Dla potrzeb oszacowania średniego rozmiaru aerozolu pyłowego w powietrzu na podstawie pomiarów nefelometrycznych posłużono się wykładnikiem Angstroma  $\text{\AA}$  [Pandolfi i in. 2011], który określono w postaci:

$$\text{\AA} = - \frac{\log(\sigma_{sp}^{\lambda_1} / \sigma_{sp}^{\lambda_2})}{\log(\lambda_1 / \lambda_2)}$$

gdzie:  $\lambda$  – długość fali:  $\lambda_1 = 450$  nm,  $\lambda_2 = 700$  nm,  $\sigma_{sp}$  – współczynnik rozpraszania odpowiednio dla fali o długości  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$ .

W zależności od rozkładu wielkości cząstek aerozoli atmosferycznych współczynnik Angstroma zmienia się od bliskiego zera dla dużych cząstek do wartości bliskich 4 dla małych cząstek – rozpraszanie Rayleigha.

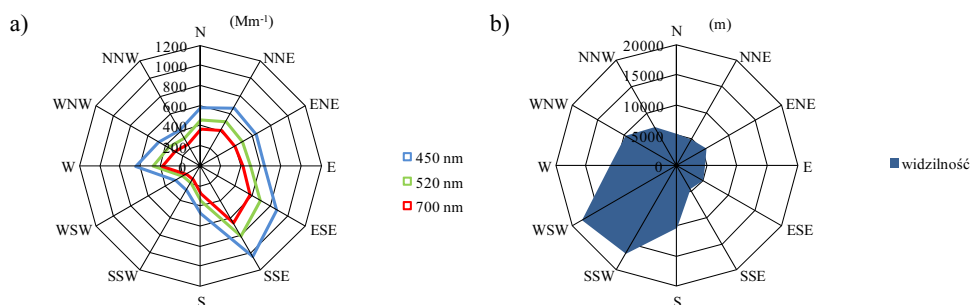
Analiza danych rozpraszania światła wykazała, że w obu miejscach pomiarowych w warstwie przyziemnej powietrza częściej występuje pył gruby. Natomiast pył drobnocząsteczkowy, jeśli występuje w powietrzu, to statystycznie częściej w Raciborzu. Tabela 6 prezentuje udział cząstek pyłowych o danej wielkości oszacowany na podstawie wykładnika Angstroma.

Tab. 6. Udział procentowy pyłu grubego i drobnocząsteczkowego w Zabrze i Raciborzu

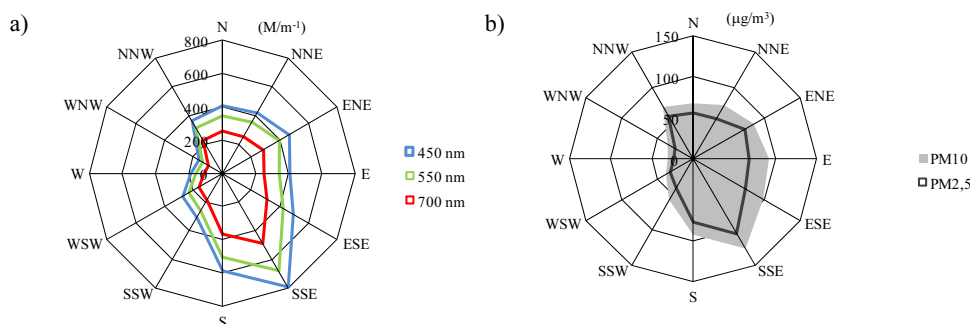
Stacja		Zabrze	Racibórz
Rok 2010	Pył gruby	97%	90%
	Pył drobnocząsteczkowy	3%	10%
Sezon letni	Pył gruby	94%	84%
	Pył drobnocząsteczkowy	6%	16%
Sezon zimowy	Pył gruby	100%	98%
	Pył drobnocząsteczkowy	-	2%

Analiza danych pomiarowych wykazała, że istnieje istotna statystycznie zależność dla poziomu ufności 0,05 między współczynnikiem rozpraszania a widzialnością poziomą oraz stężeniem pyłu zawieszonego. Ilustrują to także przedstawione na rys. 9 i 10 różne współczynników rozpraszania dla fali niebieskiej, zielonej,

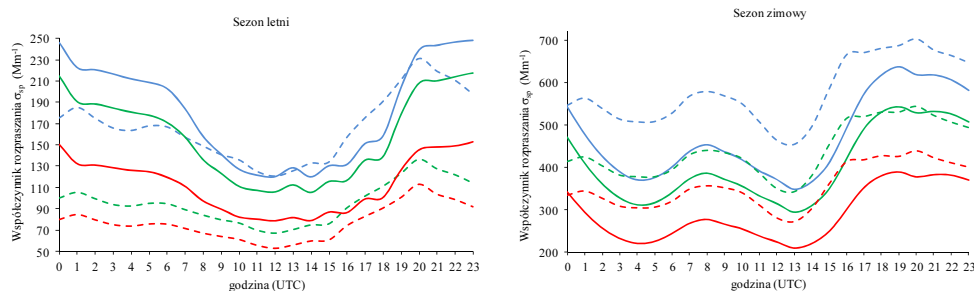
czerwonej oraz róża widzialności dla Raciborza i różę stężeń zanieczyszczeń PM dla Zabrza.



Rys. 9. Róża współczynników rozpraszania dla fali niebieskiej, zielonej, czerwonej (a) oraz róża widzialności (b) dla Raciborza – sezon zimowy (I-III, X-XII 2010)



Rys. 10. Róża współczynników rozpraszania dla fali niebieskiej, zielonej, czerwonej (a) oraz róża stężeń zanieczyszczeń PM10 i PM2,5 (b) dla Zabrza – sezon zimowy (I-III, X-XII 2010)



Rys. 11. Przebiegi dobowe współczynników rozpraszania światła dla trzech długości fal: niebieskiej (B), zielonej (G) i czerwonej (R) dla Raciborza (linie przerywane) i Zabrza (linie ciągłe) w sezonie letnim (IV-IX 2010) i zimowym (I-III, X-XII 2010)

W przebiegu sezonowym (rys. 11) notowano współczynnik rozpraszania większy w Raciborzu niż w Zabrze dla wszystkich długości emitowanej fali elektromagnetycznej. Jednocześnie na obu stacjach zaobserwowano podobny przebieg dobowy z wyraźnym maksimum w godzinach nocnych. Wynika to prawdopodobnie z wpływu kondensacji pary wodnej w przyziemnej warstwie powietrza wskutek procesów radiacyjnych. W sezonie zimowym dobowy przebieg współczynnika

rozpraszania jest dwumodalny. Naśladuje on przebieg stężeń zanieczyszczeń pyłowych powietrza i prawdopodobnie jest z nimi związany.

#### *Podsumowanie*

Z analizy rocznej serii danych wynika, że o ile wykorzystanie nefelometru pozwala na pośrednie szacowanie wielkości cząstek zmniejszających widzialność, to wykorzystanie wyników FD12P może w niektórych sytuacjach zastępować lub wspomagać system monitoringu jakości powietrza w ocenie stanu zapylenia atmosfery.

Dodatkowo widzialność mierzona metodą nefelometryczną za pomocą czujników FD12P, w które są wyposażone stacje synoptyczne PSHM IMGW-PIB, może również stanowić element wspomagający pomiary jakości powietrza, szczególnie w sytuacjach epizodów wysokich stężeń zanieczyszczeń pyłowych. Pomiar nefelometryczny własności optycznych atmosfery można wykorzystać do opracowania regionalnego wskaźnika zmętnienia pyłowego powietrza HI (*Haze Index*) [Richards 1999], który stanowi znormalizowaną skalę liczbową, klasyfikującą wartości współczynnika ekstynkcji w zależności od widzialności. Zagadnienia te wymagają jednak dalszych badań, w tym kontynuowania pomiarów bezpośrednich.

### **3. Charakterystyka zmienności liczebności drobnych i ultradrobnych cząstek aerozolu**

Zmienność liczebności cząstek drobnych i ultradrobnych w badanych lokalizacjach scharakteryzowano na podstawie wyników 15-minutowych pomiarów liczebności (stężeń liczbowych) cząstek uśrednionych do 1 godziny, a następnie do doby. Prezentowane wyniki dotyczą okresu od 1 stycznia do 31 grudnia 2010 roku. W tabelach i na rysunkach stężenie liczbowe opisano jednostką  $\#/cm^3$  – co oznacza liczbę cząstek w  $1\ cm^3$  powietrza.

W okresie badań średnie godzinowe stężenie liczbowe cząstek ultradrobnych wynosiło w Zabrze 3689/ $cm^3$ , w Raciborzu 890/ $cm^3$ , przy czym w sezonie letnim było ono wyższe i wynosiło odpowiednio 4813/ $cm^3$  w Zabrze i 1014/ $cm^3$  w Raciborzu (tab. 7, 8). Natomiast średnie godzinowe stężenie liczbowe cząstek drobnych wynosiło w Zabrze 1868/ $cm^3$ , w Raciborzu 1044/ $cm^3$ , przy czym – przeciwnie jak dla cząstek ultradrobnych – większe liczebności odnotowano w obydwu lokalizacjach w sezonie grzewczym. Stężenia liczbowe wynosiły odpowiednio 2398/ $cm^3$  w Zabrze i 1272/ $cm^3$  w Raciborzu (tab. 7, 8).

Charakter zmienności liczebności cząstek drobnych i ultradrobnych był odmienny w każdej lokalizacji. W Zabrze w sezonie grzewczym liczebności cząstek ultradrobnych i drobnych oraz odchylenie standardowe są zbliżone (bliskie wartości średniej). W sezonie letnim odnotowano prawie 3,5-krotny wzrost liczebności cząstek ultradrobnych w stosunku do drobnych przy 6,6-krotnym wzroście odchylenia standardowego. W Raciborzu odnotowano w sezonie zimowym zdecydowany przyrost liczebności cząstek drobnych i odchylenia standardowego oraz znacznie mniejszy przyrost liczebności i odchylenia standardowego cząstek ultradrobnych w sezonie letnim.

Zdecydowanie większy w sezonie zimowym niż letnim zakres stężeń godzinowych cząstek drobnych jest uzasadniony ich pochodzeniem. Większa emisja zarówno pierwotnych cząstek (np. sadzy, substancji mineralnych), jak i wtórnych związków ze spalania paliw w sezonie zimowym tłumaczy występowanie wyższych godzinowych stężeń liczbowych cząstek zarówno maksymalnych, jak i średnich w zimie.

Tab. 7. Wybrane statystyki średnich 1-godzinnych liczebności cząstek w Zabrze w 2010 roku oraz w sezonach: grzewczym i niegrzewczym

Wyszczególnienie	Fracja cząstek									
	0,02-0,03 $\mu\text{m}$	0,03-0,05 $\mu\text{m}$	0,05-0,07 $\mu\text{m}$	0,07-0,1 $\mu\text{m}$	0,1-0,2 $\mu\text{m}$	0,2-1 $\mu\text{m}$	0,02-0,1 $\mu\text{m}$ (ultradrobne)	0,1-1 $\mu\text{m}$ (drobne)	0,02-1 $\mu\text{m}$	
Rok 2010										
Liczba danych <sup>a)</sup>	8734	8734	8734	8734	8734	8734	8734	8734	8734	8734
Udział ważnych danych (%)	99,7	99,7	99,7	99,7	99,7	99,7	99,7	99,7	99,7	99,7
Minimum ( $\#/ \text{cm}^3$ )	14	13	6	5	11	5	47	35	132	
Maksimum ( $\#/ \text{cm}^3$ )	42446	21835	5646	4893	6436	17786	64570	21034	66169	
Średnia ( $\#/ \text{cm}^3$ )	1397	1124	612	556	657	1210	3689	1868	5557	
Odchylenie standardowe ( $\#/ \text{cm}^3$ )	3644	1816	584	517	654	1484	5947	1933	6647	
Percentyl 25 ( $\#/ \text{cm}^3$ )	267	333	224	206	237	364	1098	664	1855	
Mediana ( $\#/ \text{cm}^3$ )	447	583	421	398	450	753	1961	1285	3471	
Percentyl 75 ( $\#/ \text{cm}^3$ )	764	1034	796	717	836	1447	3516	2358	6397	
Sezon grzewczy 2010 r. <sup>b)</sup>										
Liczba danych <sup>a)</sup>	4349	4349	4349	4349	4349	4349	4349	4349	4349	
Udział ważnych danych (%)	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	
Minimum ( $\#/ \text{cm}^3$ )	14	13	6	5	11	16	47	40	132	
Maksimum ( $\#/ \text{cm}^3$ )	17212	10050	4321	4893	6436	17786	30584	21034	34619	
Średnia ( $\#/ \text{cm}^3$ )	587	755	589	625	789	1608	2556	2398	4953	
Odchylenie standardowe ( $\#/ \text{cm}^3$ )	658	656	515	587	761	1751	2113	2278	3960	
Percentyl 25 ( $\#/ \text{cm}^3$ )	296	354	234	221	278	527	1169	876	2121	
Mediana ( $\#/ \text{cm}^3$ )	470	596	433	437	550	1070	2018	1717	3892	
Percentyl 75 ( $\#/ \text{cm}^3$ )	711	947	765	817	1030	2002	3264	3101	6494	
Sezon niegrzewczy 2010 r. <sup>b)</sup>										
Liczba danych <sup>a)</sup>	4385	4385	4385	4385	4385	4385	4385	4385	4385	
Udział ważnych danych (%)	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	
Minimum ( $\#/ \text{cm}^3$ )	22	39	23	23	27	5	120	35	269	
Maksimum ( $\#/ \text{cm}^3$ )	42446	21835	5646	3839	4380	14143	64570	14985	66169	
Średnia ( $\#/ \text{cm}^3$ )	2201	1491	635	487	527	815	4813	1342	6156	
Odchylenie standardowe ( $\#/ \text{cm}^3$ )	4973	2423	645	427	495	1018	7967	1321	8470	
Percentyl 25 ( $\#/ \text{cm}^3$ )	235	306	211	191	212	275	1014	540	1652	
Mediana ( $\#/ \text{cm}^3$ )	416	567	406	359	375	534	1867	966	3016	
Percentyl 75 ( $\#/ \text{cm}^3$ )	957	1217	833	642	668	975	3938	1666	6190	

<sup>a)</sup> uwzględniono średnie liczebności dla godzin z przynajmniej 3 z 4 pomiarów,

<sup>b)</sup> sezon grzewczy – I i IV kwartał, sezon niegrzewczy – II i III kwartał roku.

Tab. 8. Wybrane statystyk średnich 24-godzinnych liczebności cząstek w Raciborzu w 2010 roku oraz w sezonach: grzewczym i niegrzewczym

Wyszczególnienie \ Frakcja cząstek	Frakcja cząstek									
	0,02-0,03 $\mu\text{m}$	0,03-0,05 $\mu\text{m}$	0,05-0,07 $\mu\text{m}$	0,07-0,1 $\mu\text{m}$	0,1-0,2 $\mu\text{m}$	0,2-1 $\mu\text{m}$	0,02-0,1 $\mu\text{m}$ (ultradrobne)	0,1-1 $\mu\text{m}$ (drobne)	0,02-1 $\mu\text{m}$	
Rok 2010										
Liczba danych <sup>a)</sup>	355	355	355	355	355	355	355	355	355	355
Udział ważnych danych (%)	97,3	97,3	97,3	97,3	97,3	97,3	97,3	97,3	97,3	97,3
Minimum ( $\#/ \text{cm}^3$ )	53	43	22	20	32	68	138	107	272	
Maksimum ( $\#/ \text{cm}^3$ )	3124	2249	726	647	826	3796	6473	4365	7994	
Średnia ( $\#/ \text{cm}^3$ )	314	286	156	135	173	871	890	1044	1934	
Odchylenie standardowe ( $\#/ \text{cm}^3$ )	269	216	102	86	109	592	640	678	1109	
Percentyl 25 ( $\#/ \text{cm}^3$ )	177	159	89	76	96	440	511	554	1118	
Mediana ( $\#/ \text{cm}^3$ )	259	232	132	117	152	706	752	875	1715	
Percentyl 75 ( $\#/ \text{cm}^3$ )	346	325	186	161	217	1191	984	1435	2551	
Sezon grzewczy 2010 r. <sup>b)</sup>										
Liczba danych <sup>a)</sup>	179	179	179	179	179	179	179	179	179	179
Udział ważnych danych (%)	98,4	98,4	98,4	98,4	98,4	98,4	98,4	98,4	98,4	98,4
Minimum ( $\#/ \text{cm}^3$ )	62	54	27	24	41	94	167	135	302	
Maksimum ( $\#/ \text{cm}^3$ )	620	893	476	340	579	3796	2255	4365	5868	
Średnia ( $\#/ \text{cm}^3$ )	257	241	140	130	188	1084	768	1272	2040	
Odchylenie standardowe ( $\#/ \text{cm}^3$ )	109	120	73	69	103	692	365	784	1062	
Percentyl 25 ( $\#/ \text{cm}^3$ )	174	155	87	77	108	580	497	698	1208	
Mediana ( $\#/ \text{cm}^3$ )	244	224	132	124	170	949	730	1123	1956	
Percentyl 75 ( $\#/ \text{cm}^3$ )	313	297	171	160	250	1499	938	1770	2742	
Sezon niegrzewczy 2010 r. <sup>b)</sup>										
Liczba danych <sup>a)</sup>	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176
Udział ważnych danych (%)	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2	96,2
Minimum ( $\#/ \text{cm}^3$ )	53	43	22	20	32	68	138	107	272	
Maksimum ( $\#/ \text{cm}^3$ )	3124	2249	726	647	826	1674	6473	2335	7994	
Średnia ( $\#/ \text{cm}^3$ )	372	331	172	139	157	655	1014	812	1826	
Odchylenie standardowe ( $\#/ \text{cm}^3$ )	357	274	123	100	114	356	814	444	1147	
Percentyl 25 ( $\#/ \text{cm}^3$ )	194	176	92	74	84	383	541	469	1041	
Mediana ( $\#/ \text{cm}^3$ )	272	249	132	109	127	603	772	738	1563	
Percentyl 75 ( $\#/ \text{cm}^3$ )	410	426	210	165	187	844	1293	1034	2374	

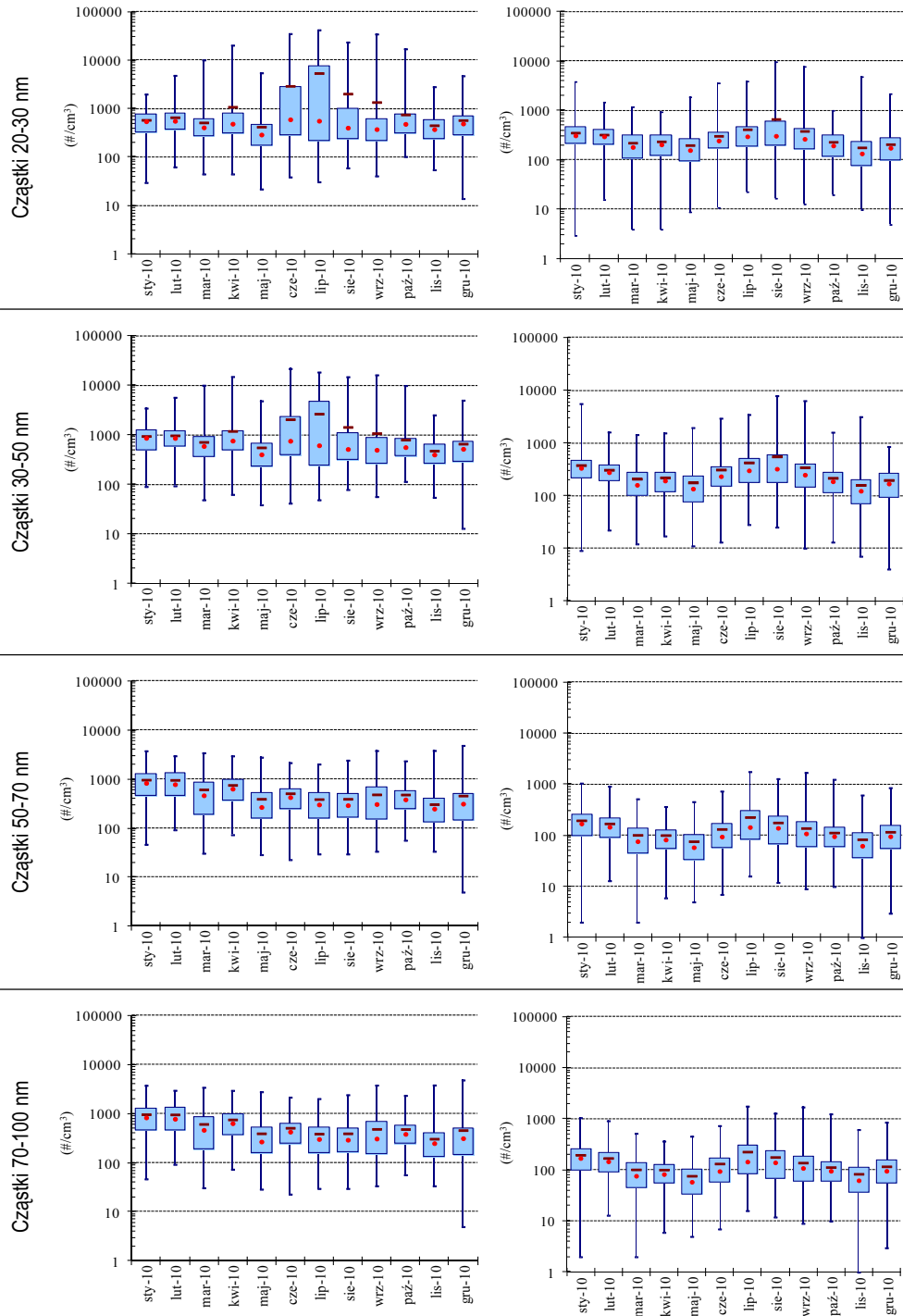
<sup>a)</sup> uwzględniono średnie liczebności dla dni z przynajmniej 75% pokryciem czasowym,

<sup>b)</sup> sezon grzewczy – I i IV kwartał, sezon niegrzewczy – II i III kwartał roku.

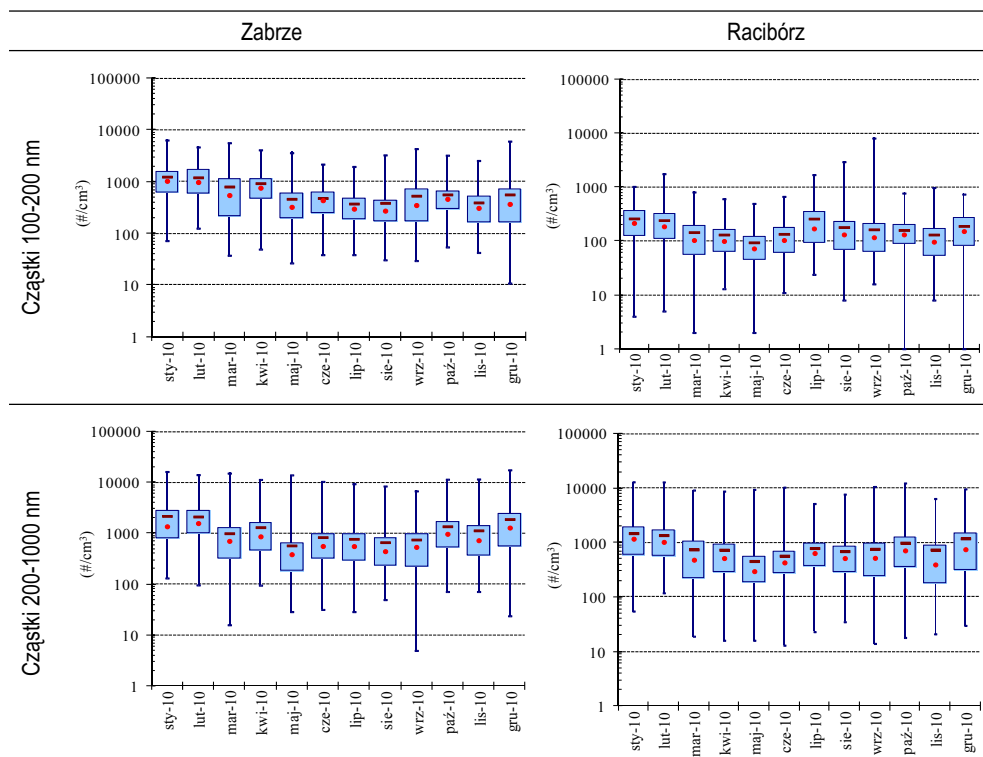
W obu lokalizacjach charakter zmienności miesięcznej badanych frakcji cząstek ultradrobnych (20-30 nm, 30-50 nm, 50-70 nm, 70-100 nm), a nawet frakcja cząstek o średnicach w przedziale 100-200 nm nie wykazuje znaczących różnic miesięcznych ani w rozpiętości stężeń godzinowych, ani w charakteryzujących te zbiory – medianach i średnich (rys. 12).

Zabrze

Racibórz





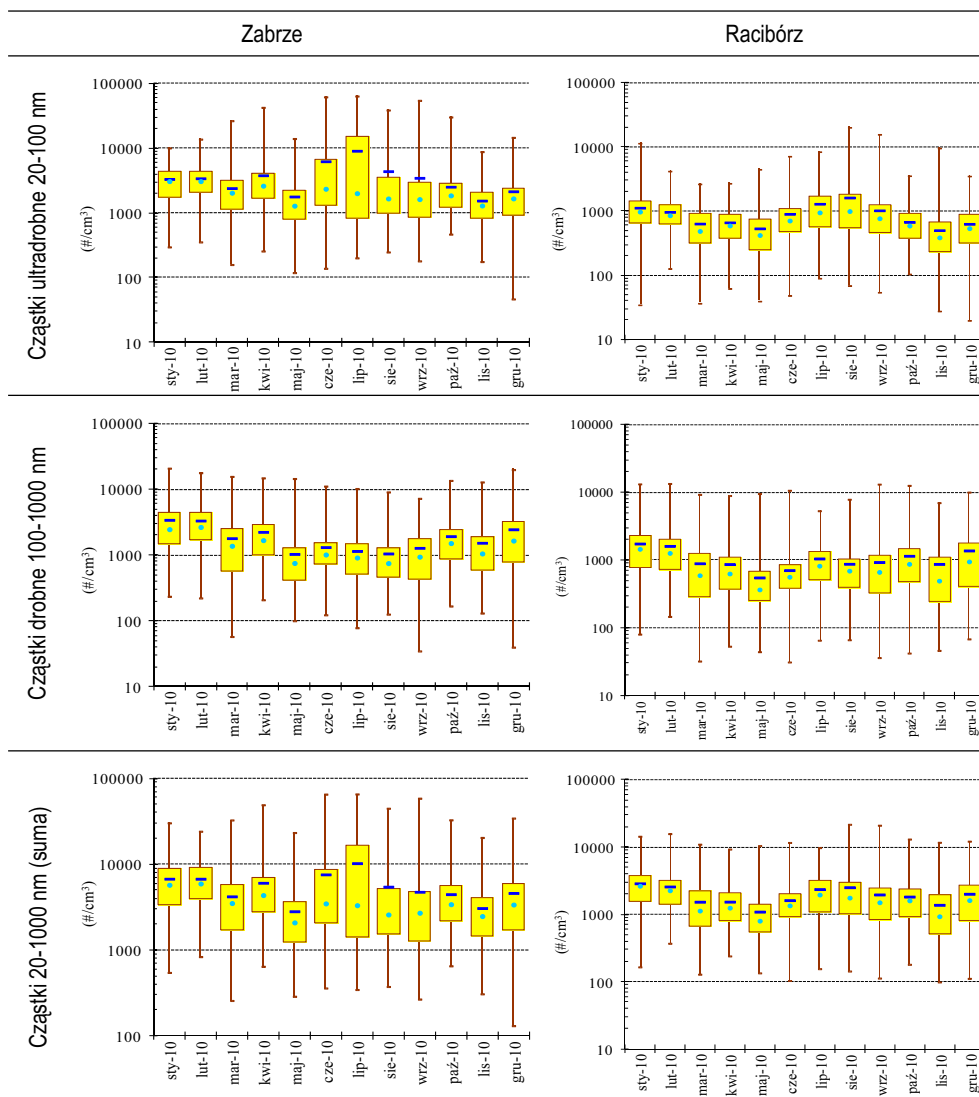


Rys. 12. Statystyka 1-godzinnych średnich liczebności cząstek w Zabrze i Raciborzu w poszczególnych miesiącach 2010 roku („wąsy” wykresu skrzynkowego to zakres stężeń, skrzynka – 25 i 75 percentyl, linia pozioma – średnia, kółeczko – mediana)

Bardzo podobny przebieg i parametry zmienności odnotowano w obu lokalizacjach dla frakcji 200-1000 nm. Jak widać, że stężenia godzinowe (ich średnia i mediana) wyraźnie wzrastają w miesiącach zimowych (grzewczych), a rozpiętość wyników jest największa dla miesięcy przejściowych, kiedy to emisja pierwotna ze spalania jest okresowa (liczba dni grzewczych zależy od temperatury powietrza).

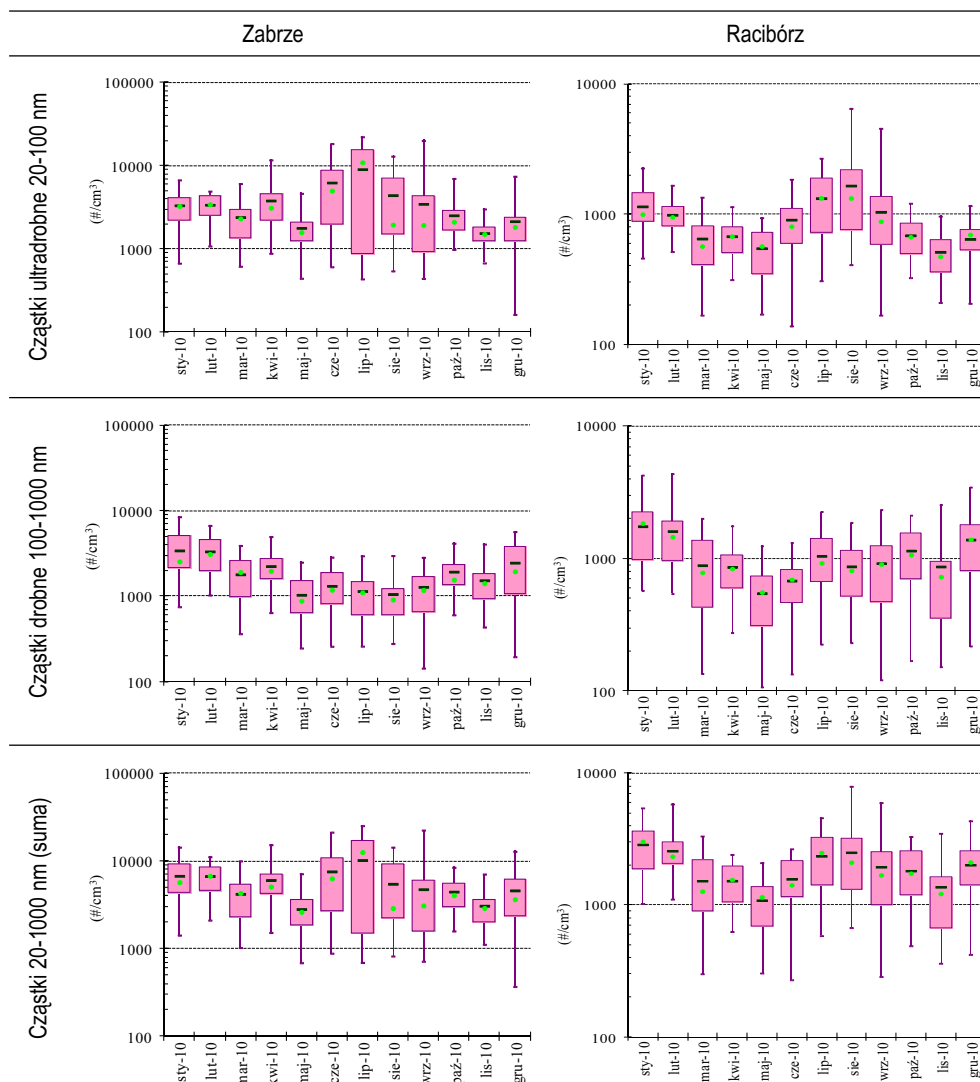
Średnie miesięczne stężenia liczbowe cząstek 20-1000 nm i udział cząstek drobnych i ultradrobnych dla średnich 1-godzinnych i dla średnich dobowych przedstawiono na rys. 13 i 14. W obu przypadkach uwidacznia się odrębny miesięczny charakter zmienności ilustrujący zachodzące w atmosferze procesy nukleacji, powodujące wzrost liczebności cząstek ultradrobnych w okresach intensywnego nasłonecznienia (sezonie letnim) i wzrost liczebności cząstek pochodzenia antropogenicznego w sezonie zimowym.

W okresie badań cząstki ultradrobne stanowiły średnio 66% wszystkich cząstek w Zabrze i 46% w Raciborzu. Wskazuje to na odmienny charakter pola emisji pierwotnych PM i ich prekursorów w tych obszarach i związaną z nim intensywność procesów nukleacji.



Rys. 13. Statystyka 1-godzinnych średnich liczebności cząstek ultradrobnych i drobnych w Zabrze i Raciborzu w poszczególnych miesiącach 2010 roku („wąsy” wykresu skrzynkowego to zakres stężeń, skrzynka – 25 i 75 percentyl, linia pozioma – średnia, kółeczko – mediana)

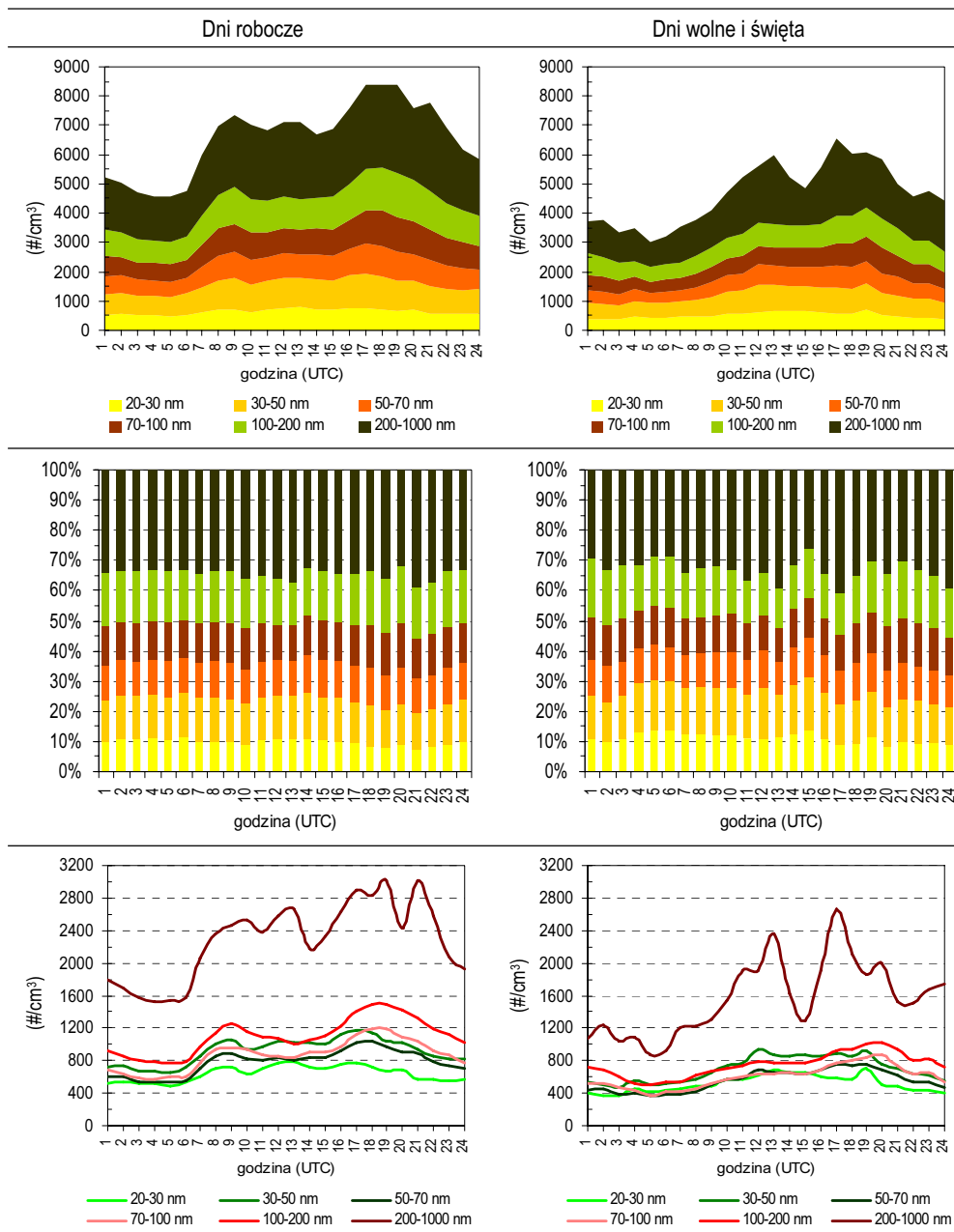
Cząstki frakcji 200-1000 nm wchodzące w skład PM10 mają znaczący wpływ na jego stężenie w powietrzu. Natomiast ultradrobne cząstki sadzy emitowane do powietrza, w większych ilościach w zimie, bardzo szybko stają się jądrami kondensacji dla emitowanych z tych samych procesów węglowodorów. Tym samym cząstki sadzy, niekiedy pierwotnie bardzo drobne, szybko wchodzą we frakcję akumulacji.



Rys. 14. Statystyka 24-godzinnych średnich liczebności cząstek ultradrobnych i drobnych w Zabrze i Raciborzu w poszczególnych miesiącach 2010 roku („wąsy” wykresu skrzynkowego to zakres stężeń, skrzynka – 25 i 75 percentyl, linia pozioma – średnia, kółeczko – mediana)

Stężenia liczbowe pyłu oprócz opisanych wcześniej sezonowych zmienności wynikających z warunków emisyjnych i intensywności procesów fizykochemicznych zachodzących w atmosferze mają też wyraźny charakterystyczny przebieg dobowy wynikający z cyklu emisyjnego i termodynamicznego. Charakterystykę zmienności dla obu lokalizacji ilustrują rys. 15-18.

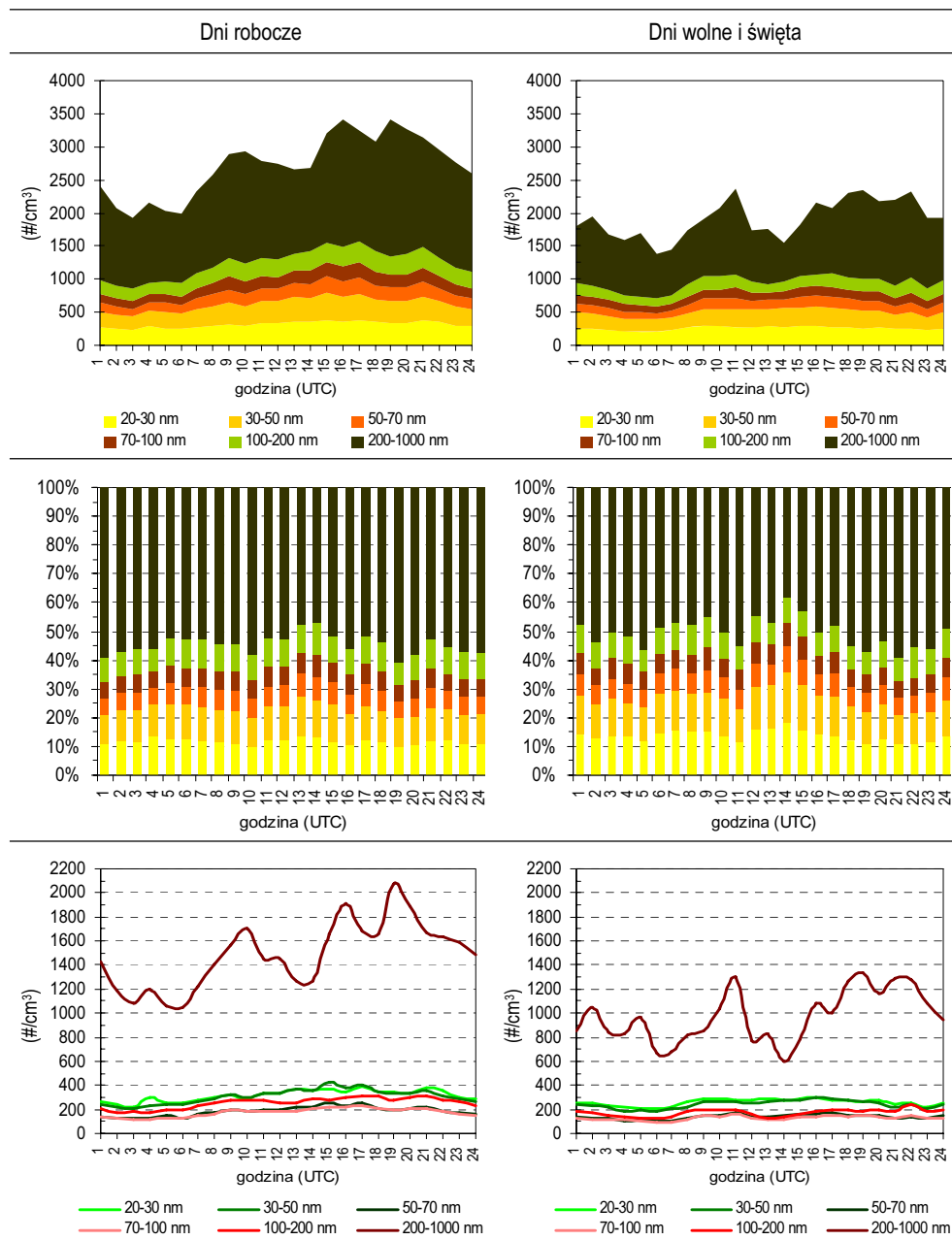
Stwierdzono wyraźne zróżnicowanie przebiegów godzinowych stężeń liczbowych poszczególnych frakcji w sezonie letnim i zimowym w obu lokalizacjach.



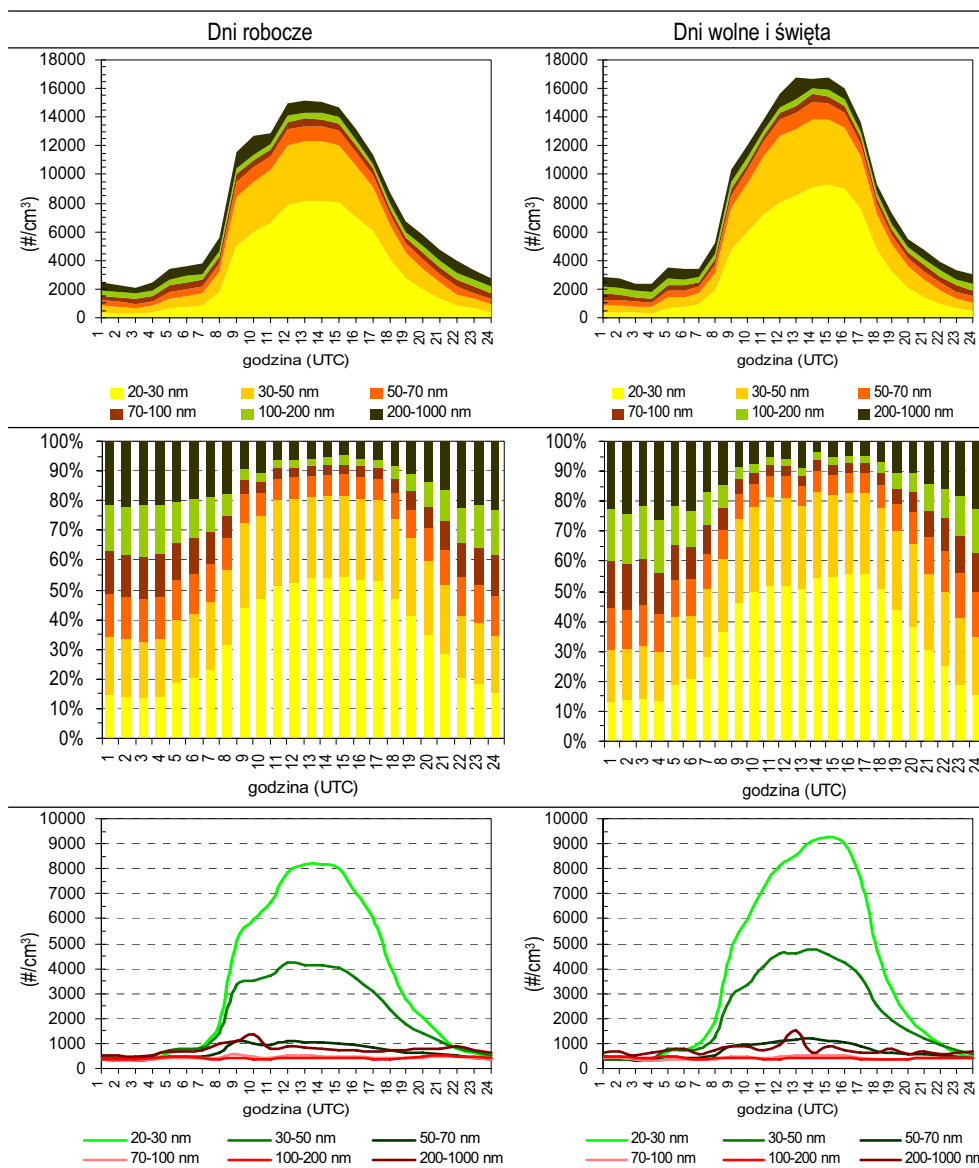
Rys. 15. Zmienność średnich 1-godzinnych liczebności cząstek w ciągu doby w Zabrze, w porze zimowej, w dniach roboczych oraz w dniach wolnych i w święta w 2010 roku

Różnice te są związane zarówno z procesami formowania cząstek – różnymi dla różnych frakcji rozmiarowych, a także z dalszymi przemianami cząstek w atmosferze. W obu lokalizacjach w sezonie zimowym odnotowano wyraźny spadek

liczebności cząstek 200-1000 nm w okolicach godz. 14. W pozostałych frakcjach odnotowuje się stopniowy wzrost liczebności, z porannym i popołudniowym pi-kiem związanym prawdopodobnie z emisją komunikacyjną.



Rys. 16. Zmienność średnich 1-godzinnych liczebności cząstek w ciągu doby w Raciborzu, w porze zimowej, w dniach roboczych oraz w dniach wolnych i w święta w 2010 roku

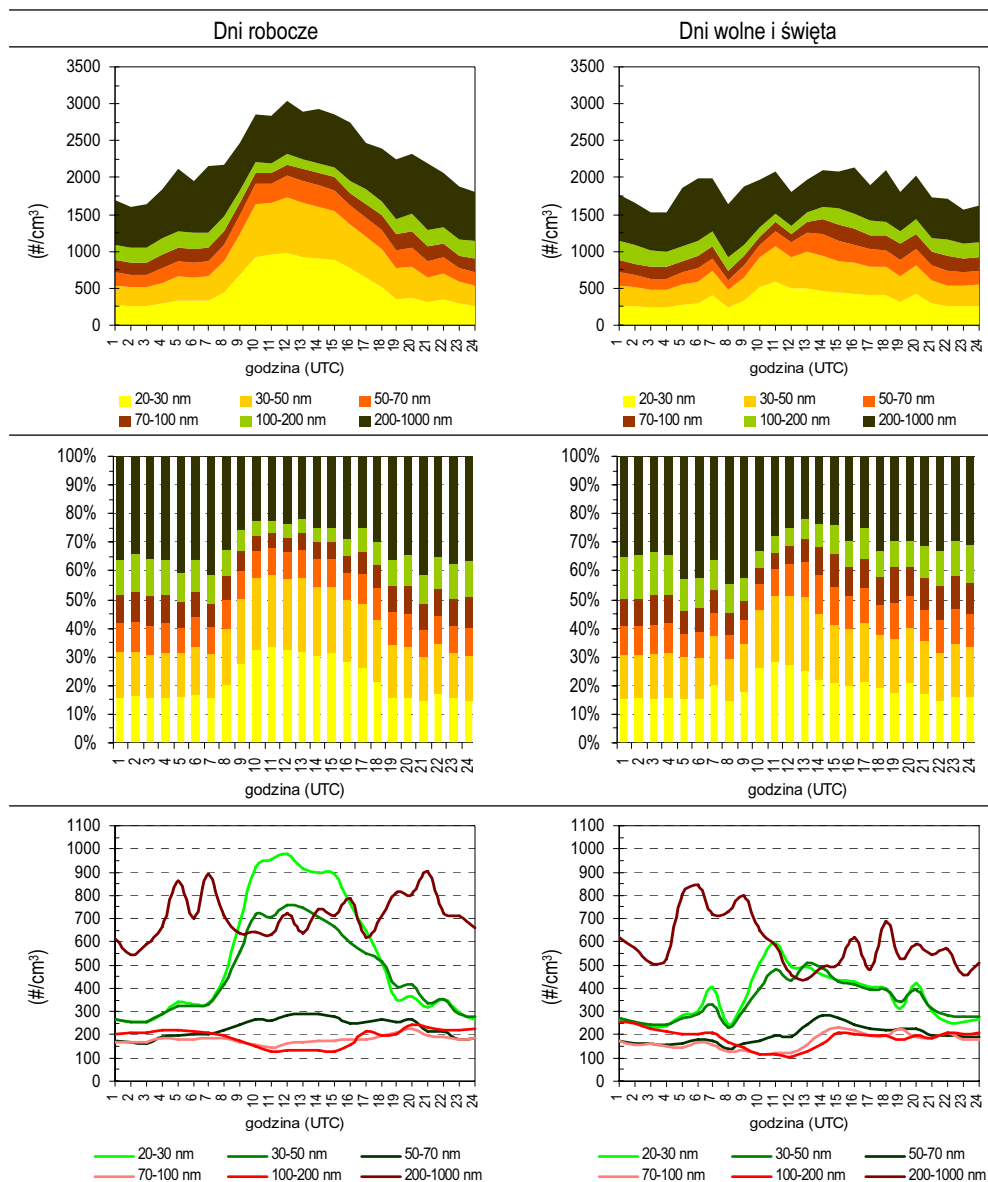


Rys. 17. Zmienność średnich 1-godzinnych liczebności cząstek w ciągu doby w Zabrze, w porze letniej, w dniach roboczych oraz w dniach wolnych i w święta w roku 2010

W dni świąteczne i wolne od pracy odnotowano relatywny spadek stężeń we wszystkich zakresach pomiarowych, co może być związane ze mniejszą emisją komunikacyjną i przemysłową.

Sezon letni charakteryzuje się zdecydowaną przewagą liczebności cząstek ultradrobnych. Dobowa zmienność wykazuje wyraźny cykl wzrostu liczebności od godz. 5 z maksimum w godzinach 14-16 i powolny spadek do poziomu wyjściowego. W przypadku Raciborza (stacji tła) zależności te są mniej wyraźne, gdyż

udział cząstek drobnych i ultradrobnych jest porównywalny. Wskazuje to na mniejszą ilość prekursorów PM w powietrzu, co przy podobnych warunkach radiacyjnych skutkuje mniejszą intensywnością procesów nukleacji. Występujące w Raciborzu wyraźne maksimum poranne w zakresie 200-1000 nm (rys. 18) wskazuje na występowanie oddziaływań związanych z emisją komunikacyjną i komunalną (spalanie w gospodarstwach domowych).

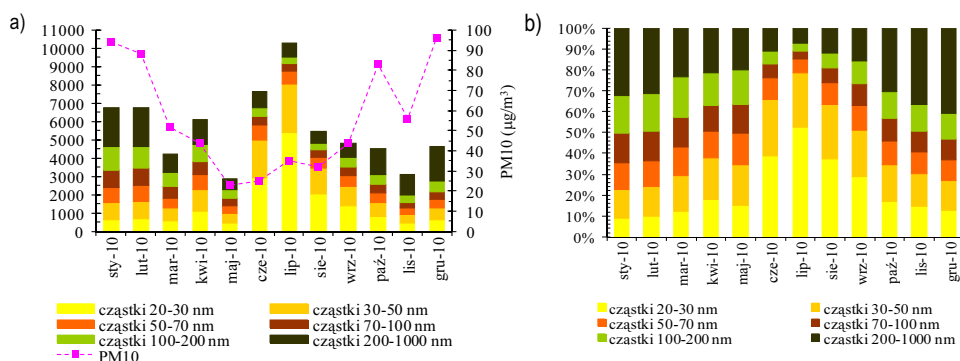


Rys. 18. Zmienność średnich 1-godzinnych liczebności cząstek w ciągu doby w Raciborzu, w porze letniej, w dniach roboczych oraz w dniach wolnych i w święta w roku 2010

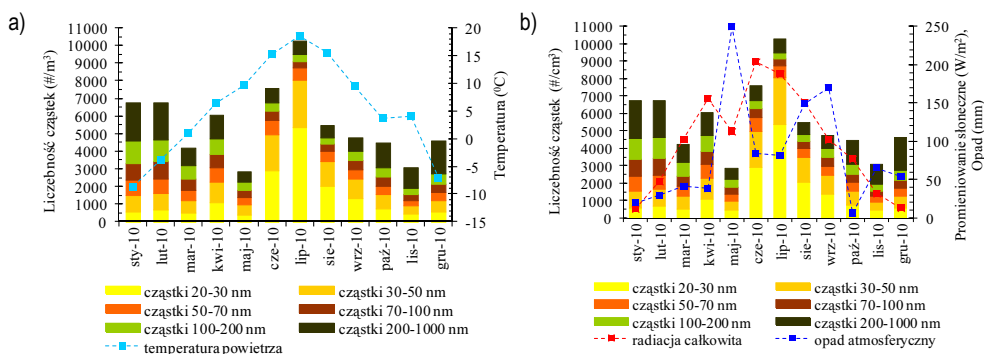
Interesująca jest stwierdzona w Zabrze większa liczebność cząstek w dni wolne od pracy; sugeruje występowanie efektu kumulacji cząstek w strefie miejskiej wyspy ciepła i efektów wtórnych przemian nagromadzenia prekursorów PM w powietrzu aglomeracji śląskiej. W przypadku stacji tła efekt ten nie istnieje – tam w dni wolne od pracy liczebność cząstek jest mniejsza i zmienność liczebności cząstek ultradrobnych mniej intensywna niż w dni robocze (rys. 18).

Liniowa zależność między średnimi godzinowymi liczbowymi stężeniami cząstek a stężeniami wybranych gazowych zanieczyszczeń powietrza i sadzy wskazuje na istotne znaczenie pierwotnej emisji ze spalania (między innymi sadzy) w kształtowaniu się stężeń liczbowych poszczególnych frakcji. Wysokie korelacje między stężeniami NO<sub>x</sub> a liczebnością cząstek (w całym zakresie ziarnowym 20-1000 nm) w połączeniu z dobowymi przebiegami stężeń godzinowych, pozwalają stwierdzić istotny wpływ pierwotnej emisji zanieczyszczeń gazowych (reprezentują ją NO<sub>x</sub>, ale także węglowodory) z komunikacji na stężenia liczbowe i udział poszczególnych frakcji rozmiarowych w aerozolu pyłowym w Zabrze.

Istotne znaczenie dla stężenia liczbowego ultradrobnych cząstek PM, mają warunki meteorologiczne. Ilustrują to zależności przedstawione na rys. 19-21.

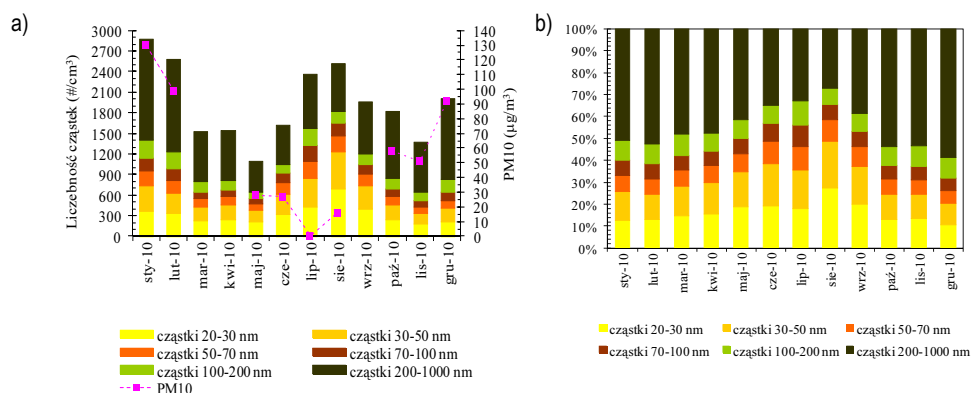


Rys. 19. Średnie miesięczne liczebności cząstek o wymiarze 20-1000 nm na tle stężenia pyłu PM10 (a) oraz udział poszczególnych frakcji cząstek (b) w Zabrze w 2010 roku

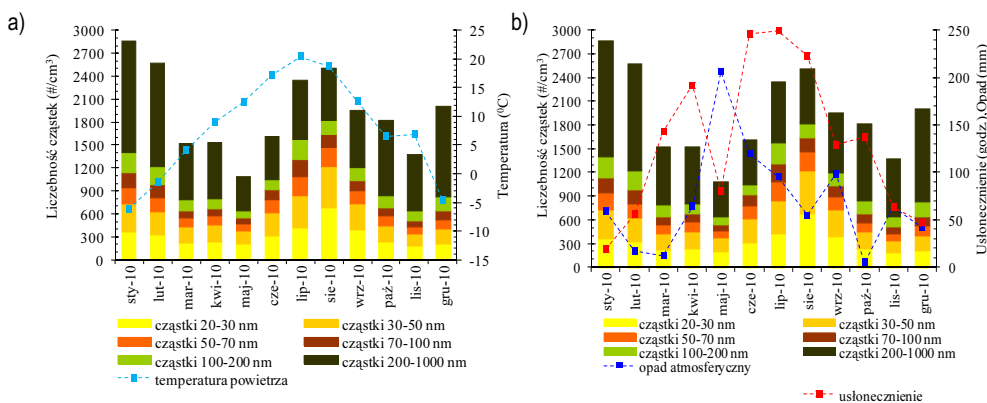


Rys. 20. Średnie miesięczne liczebności cząstek o wymiarze 20-1000 nm na tle temperatury powietrza (a) oraz natężenia promieniowania słonecznego i opadu atmosferycznego (b) w Zabrze w 2010 roku

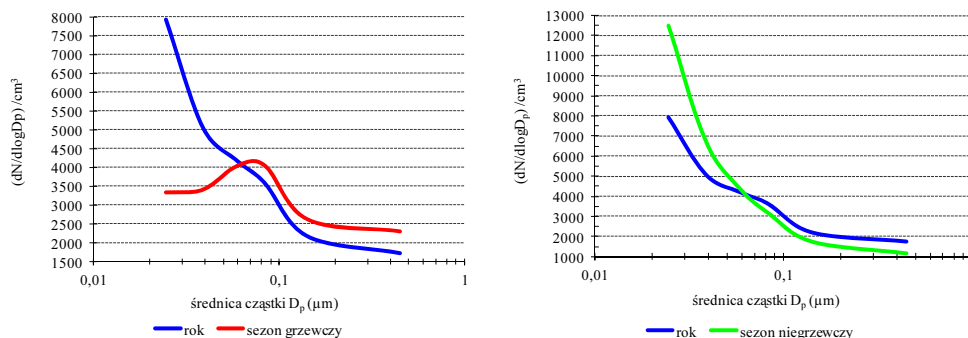




Rys. 21. Średnie miesięczne liczebności cząstek o wymiarze 20-1000 nm na tle stężenie pyłu PM10 (a) oraz udział poszczególnych frakcji cząstek (b) w Raciborzu w 2010 roku



Rys. 22. Średnie miesięczne liczebności cząstek o wymiarze 20-1000 nm na tle temperatury powietrza (a) oraz usłonecznienia i opadu atmosferycznego (b) w Raciborzu w 2010 roku

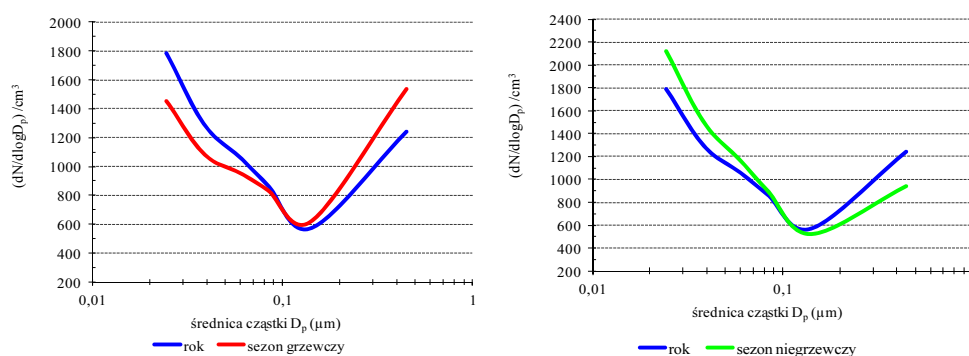


Rys. 23. Rozkład średnich liczebności cząstek o wymiarze  $< 1 \mu\text{m}$  w Zabrze w 2010 roku oraz w sezonach: grzewczym i niegrzewczym

Wzrost temperatury średniej powoduje przyrost liczebności cząstek ultradrobnych, co jest związane z wpływem radiacji (nawet w warunkach zimowych wzrost radiacji może stymulować pojawianie się większych liczebności cząstek UFP). Na

liczebność cząstek drobnych i ultradrobnych mają wpływ również warunki opadowe – wzrost sumy opadów skutkuje spadkiem stężeń ww. frakcji pyłów, co wiąże się zarówno z mechanizmem kondensacji pary wodnej inicjowanym przez te cząstki jak też procesami ich wymywania.

Odmienne charakter mechanizmów związanych z kształtowaniem się rozkładu liczebności cząstek w obszarach tła i aglomeracji ilustrują wykresy rozkładów liczebności cząstek względem średnicy aerodynamicznej (rys. 23, 24).



Rys. 24. Rozkład średnich liczebności cząstek o wymiarze  $< 1 \mu\text{m}$  w Raciborzu w 2010 roku oraz w sezonach: grzewczym i niegrzewczym

W Zabrze istnieje wyraźne zróżnicowanie przebiegu rozkładu liczebności dla sezonu letniego i zimowego. W sezonie zimowym kluczowym czynnikiem kształtującym rozkład jest emisja cząstek ok. 60-100 nm. Należy przypuszczać, że jest to wpływ emisji sadzy ze spalania paliw w gospodarstwach domowych i gospodarce komunalnej oraz zwiększona emisja komunikacyjna. W przypadku lokalizacji tłowej występuje pewien wzrost liczebności w tym zakresie frakcyjnym jednak stosunkowo niska liczebność w całym przedziale nie powoduje tak wyraźnych zmian rozkładu jak w Zabrze. W obu lokalizacjach w sezonie letnim należy oczekiwać występowania maksimum liczebności cząstek o średnicach poniżej 20 nm.

Przeprowadzone badania ilustrują przydatność badań liczebności cząstek UFP przy analizie procesów zachodzących w atmosferze zarówno w aspekcie oceny narażenia populacji, jak też przy analizie efektów klimatycznych. Informacje uzyskane w trakcie rocznej serii pomiarowej dokumentują występujące w obszarach o wysokiej antropopresji wysokie narażenie populacji na cząstki ultradrobne w sezonie letnim, gdy występują relatywnie niskie stężenia masowe pyłu a czas przebywania ludzi na otwartym powietrzu jest zdecydowanie dłuższy.

Spostrzeżenia, te wskazują na potrzebę lepszego poznania własności ekotoksycznych cząstek ultradrobnych, zwłaszcza w obszarach o wysokiej gęstości zaludnienia i wysokim poziomie emisji prekursorów cząstek stałych i wysokiej emisji z procesów spalania. Badania stężenia liczbowego drobnych i ultradrobnych cząstek winny być elementem sieci pomiarowych w aglomeracjach, dla wsparcia prognoz narażenia i winny wejść jako czynnik ryzyka do prognozy wskaźnika jakości powietrza (AQI).

#### **4. Analiza składu chemicznego frakcji cząstek drobnych**

Aerozol atmosferyczny absorbuje światło i najefektywniej robią to cząstki węgla elementarnego [Cyrus i in. 2003, Pastuszka i in. 2003]. Korelacja między absorpcją światła a ilością węgla w powietrzu może być wysoka, nawet 0,96 [Molnar i in. 1999]. Sezonowe zmiany pochłaniania światła przez powietrze atmosferyczne na Śląsku są zgodne ze zmianami stężenia PM<sub>2,5</sub>, który w lecie w powierzchniowej warstwie zawiera 80%, a w zimie 70% atomów węgla [Pastuszka i in. 2003].

Najsilniejszy wpływ zanieczyszczenia powietrza na zjawiska zdrowotne w populacji mają wielkości związane z masą PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> [Monn 2001]. Zjawiska zdrowotne wywoływane przez cząstki ultradrobne, o średnicach 0,01-0,1 µm, są natomiast związane bardziej z liczbą niż masą cząstek [Peters i in. 1997, Morawska i in. 1999]. Największe znaczenie dla organizmu ludzkiego ma oddziaływanie aerozolu poprzez układ oddechowy. Stopień zagrożenia ze strony wdychanych cząstek zależy od ich składu chemicznego, w tym zawartości toksycznych substancji i miejsca depozycji w układzie oddechowym [Hsiao i in. 2000, Massolo i in. 2002, Tong i in. 2002, Englert 2004, de Kok i in. 2005, Pope i Dockery 2006].

Powyższe fakty dowodzą, że skład chemiczny pyłu zawieszonego, zwłaszcza drobnych cząstek, jest obok stężenia tych cząstek w powietrzu, krytycznym parametrem uzależniającym sposób oddziaływania pyłu w skali lokalnej i globalnej.

Najogólniej, substancje chemiczne odpowiedzialne za prawie całą masę pyłu zawieszonego w rejonach zurbanizowanych można podzielić na sześć grup [Chow 1995]: materiał geologiczny (tlenki aluminium, krzem, wapń, tytan, żelazo), węgiel organiczny (setki związków), węgiel elementarny, siarczany, azotany i amoniak.

W obszarach zurbanizowanych w skład aerozolu atmosferycznego wchodzi również pierwiastki śladowe, a także woda absorbowana przez związki rozpuszczalne, gdy względna wilgotność powietrza przekracza 70%, a w niektórych rejonach rozpuszczalne w wodzie sól i chlorki.

Badania składu chemicznego pyłu były przedmiotem setek prac na świecie [m.in. Pakkanen i in. 2001; Querol i in. 2001; Ragosta i in. 2006; Carbone i in. 2010]. Jednak aktualne zestawienia danych na temat właściwości fizycznych i chemicznych aerozoli w Europie [m.in. EMEP 2011; COST 2009] sugerują, że obszary, w których aerozol był w pełni charakteryzowany są wciąż nieliczne. Dotyczy to głównie frakcji pyłów drobnych (PM<sub>2,5</sub> czy PM<sub>1</sub>). Na przykład w Polsce dwa projekty realizowane na zlecenie GIOŚ, a finansowane ze środków NFOŚiGW, pozwoliły na ocenę składu chemicznego PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> w kilku lokalizacjach [GIOŚ 2008, GIOŚ 2011]. Badania te dotyczyły jednak głównie obszarów o wysokiej antropopresji. Ponadto, do tej pory nie badano w Polsce składu pyłu PM<sub>1</sub> w długookresowej, ciągłej kampanii pomiarowej.

Celem tego etapu pracy było wyznaczenie i porównanie stężeń masowych i składu chemicznego pyłu PM<sub>1</sub> w dwóch obszarach – miejskim (w Zabrze) i wiejskim (w Raciborzu) – w pięciomiesięcznej serii badań od 1 sierpnia do 31 grudnia 2009 roku w Zabrze i od 1 sierpnia do 31 grudnia 2010 roku w Raciborzu.

Próbki PM1 zbierano za pomocą jednokanałowego pobornika Parisol firmy Ruprecht&Patashnik na filtrach kwarcowych i teflonowych używanych naprzemiennie co drugi dzień. Filtry przed i po pobraniu pyłu kondycjonowano (48 godzin w laboratorium wagowym, przy stałej wilgotności  $45\pm 5\%$  w temperaturze powietrza  $20\pm 2^\circ\text{C}$ ) i ważono dwukrotnie, w odstępie 24 godzin, na mikrowadze Mettler Toledo (rozdzielczość 2  $\mu\text{g}$ ).

Wszystkie dobowe próbki pyłu zebrane na filtrach teflonowych przeznaczono do analizy składu pierwiastkowego. Z filtrów kwarcowych z pyłem wycięto po dwa fragmenty o powierzchni 1,5  $\text{cm}^2$ . Jeden poddano analizie zawartości węgla organicznego (OC) i elementarnego (EC). Drugi analizowano pod względem zawartości w pyłe jonów rozpuszczalnych w wodzie (próbka łączona ze wszystkich wycinków dla jednego miesiąca).

Zawartość OC i EC w próbkach badano analizatorem węgla Sunset Laboratory Inc. Analizator wyposażony jest w detektor FID. W ramach programu kontroli jakości, podczas oznaczeń analizowano próbki materiału referencyjnego firmy NIST (RM 8785 NIST oraz RM 8786 NIST) z certyfikowaną zawartością węgla. Uzyskano odzysk na poziomie 98-122% wartości certyfikowanej dla węgla organicznego i 91-116% wartości certyfikowanej dla węgla elementarnego.

Metodykę przygotowania ekstraktów wodnych próbek pyłu i parametry analizy chromatograficznej (do oznaczenia użyto Herisau Metrohm AG ion chromatograph) opisano w pracach [GIOŚ 2011, Rogula-Kozłowska i in. w druku]. W pracach tych opisano również metodykę i parametry oznaczania składu pierwiastkowego pyłu metodą fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii EDXRF (spektrometr Epsilon 5 firmy PANalytical).

Tab. 9. Stężenie pyłu PM1 i jego składników w sezonie letnim (sierpień-wrzesień) i zimowym (październik-grudzień) w Zabrzu i Raciborzu ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) na tle danych literaturowych

PM1 i jego składniki	Zabrze		Racibórz		Finlayson-Pitts i Pitts 1986	
	sezon letni	sezon zimowy	sezon letni	sezon zimowy	obszar miejski	obszar pozamiejski
PM1	20,61	46,04	15,47	43,20	42	24
MO	9,35	26,05	5,43	24,41	7,6*	3,3
EC	1,24	4,61	0,63	3,66		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,30	2,01	1,11	2,71	0,25	0,3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3,27	4,66	2,01	3,06	17	12,0
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,10	0,32	0,50	1,47	4,3	2,3
Cl <sup>-</sup>	0,66	1,21	0,83	1,94	-	-
Na <sup>+</sup>	0,55	1,78	0,76	0,73	-	-
MM	1,92	2,41	0,74	1,22	0,61**	0,10
PP	0,37	0,34	0,11	0,31	0,48***	0,10

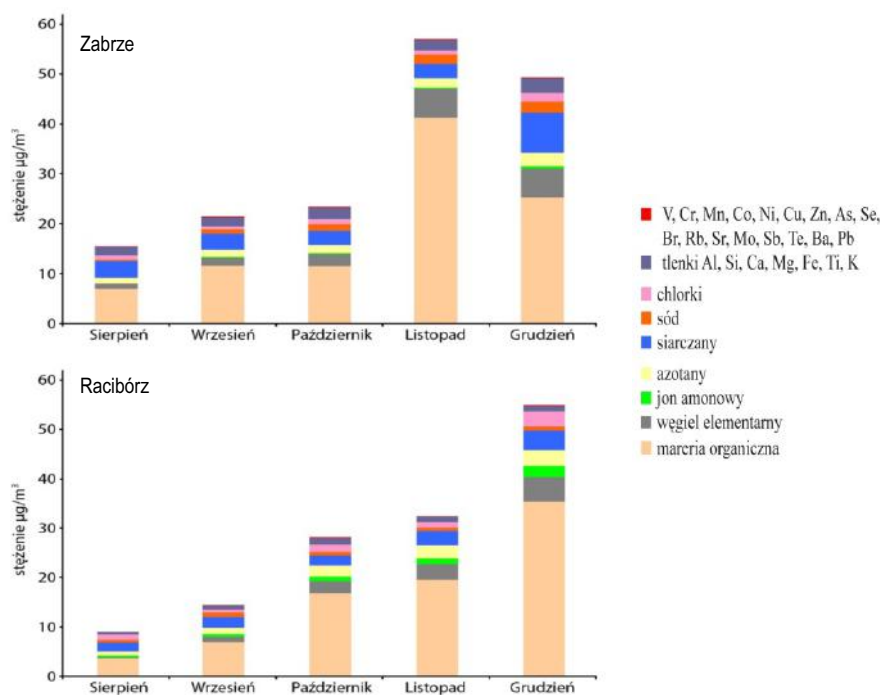
\*stężenie pierwiastka C, \*\*stężenie sumy Al, Si, Ca i Fe, \*\*\*stężenie Pb

Stężenia średnie pyłu i jego składników były obliczane przez sumowanie masy pyłu lub składnika w miesiącu i podzielenie tej masy przez całkowitą objętość powietrza, z której ją pobrano (łączna objętość powietrza w danym miesiącu). Stężenia średniookresowe PM1 i jego składników oraz udziały procentowe klas skład-

ników w jego masie obliczono jako średnią arytmetyczną ze stężeń średnich miesięcznych w danym sezonie – sezon letni (sierpień, wrzesień) i sezon zimowy (październik-grudzień).

Na rysunku 25 pokazano skład chemiczny PM1 w Zabrze i w Raciborzu w kolejnych miesiącach badań, a w tab. 9 zestawiono wartości stężeń wybranych klas składników pyłu w obu lokalizacjach w dwóch sezonach.

Stężenie materii organicznej (*MO*) w powietrzu zostało oszacowane przez pomnożenie stężenia OC przez współczynnik 1,4 [Grosjean, Friedlander 1975]. Stężenie materii mineralnej (*MM*) oszacowano na podstawie przeliczenia stechiometrycznego stężeń Al, Si, Ca, Mg, Fe, Ti, K na stężenia tych tlenków, które powszechnie występują w skorupie ziemskiej [Rogula-Kozłowska i in. w druku, Malm i in. 1994, Querol i in. 2001]. Pozostałe pierwiastki (*PP*) to suma stężeń: V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Mo, Sb, Te, Ba, Pb.



Rys. 25. Stężenia składników pyłu PM1 w miesiącach badań w Zabrze i Raciborzu

W Raciborzu, na stacji spełniającej kryteria stacji tła regionalnego, stężenie w okresie letnim 2010 roku wynosiło 15,5, a w okresie zimowym 43,2 µg/m<sup>3</sup>. Są to wartości bardzo duże. Odnosząc je do wytycznych WHO dla PM2,5 [WHO 2008], wg których średnie roczne stężenie PM2,5 nie powinno przekraczać 10 µg/m<sup>3</sup>, można zauważyć skalę problemu. Stężenie PM1 w Raciborzu jest wysokie także w odniesieniu do wytycznych Unii Europejskiej, w których wartość dopuszczana średniego rocznego stężenia PM2,5 to 25 µg/m<sup>3</sup>. Jednak wartości te są duże przede

wszystkim w porównaniu ze stężeniami notowanymi na różnych stanowiskach w Europie (tab. 10). Najwyższe stężenia PM1 odnotowano w Raciborzu w miesiącach zimowych. W miesiącach letnich stężenia były zdecydowanie niższe i nie przekraczały  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

W Zabrze, na stacji tła miejskiego, średnie stężenie w okresie letnim 2009 roku wynosiło 20,6, a w okresie zimowym  $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Należy zwrócić uwagę, że stężenie to było bardzo wysokie w porównaniu ze stężeniami notowanymi na większości europejskich stacji tła miejskiego, jednak nie było znacznie wyższe niż zanotowane w obszarze Raciborza. O kształtowaniu stężeń średnich w całym okresie pomiarowego w Zabrze decyduje, podobnie jak w Raciborzu, sytuacja imisyjna w miesiącach sezonu grzewczego. Najwyższe stężenie wystąpiło w listopadzie – sięgało prawie  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . W sezonie letnim stężenia średnie miesięczne w punkcie tła miejskiego w Zabrze były zdecydowanie niższe.

Skład chemiczny PM1 w Zabrze i Raciborzu był podobny. W obu miejscach PM1 składa się głównie ze związków węgla organicznego, węgla elementarnego oraz jonów siarczanowych, azotanowych, amonowego, chlorków oraz sodu. W obu miejscach stężenia pyłu i związanych z nim związków węgla i składników nieorganicznego aerozolu wtórnego (*NAW* – suma siarczanów, azotanów i jonu amonowego) są wyższe w miesiącach zimowych – najwyższe w listopadzie i grudniu. Zdecydowanie wyższe stężenia wymienionych składników obserwowano w tych samych miesiącach na stanowisku miejskim (Zabrze) niż w obszarze tła regionalnego (Raciborz). Pierwszy fakt ma związek z rosnącą emisją pyłu i jego prekursorów w okresie grzewczym w całej Polsce (charakterystyczny jest wzrost stężenia  $\text{EC}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  w obu miejscach w grudniu). Drugi wynika z charakteru stacji, czyli w Zabrze z wpływu zagęszczenia źródeł pyłu drobnego w mieście i innych otaczających go dużych miastach południowej Polski, a w Raciborzu z otoczenia stacji otwartym, typowo wiejskim, czystym obszarem bez bezpośredniego oddziaływania przemysłowych i komunikacyjnych źródeł drobnego pyłu.

Skład chemiczny pyłu w obu lokalizacjach różni się nieco od pokazanego w pracy [Finlayson-Pitts, Pitts 1986] „modelowego” składu pyłu drobnego w obszarze miejskim (kanion uliczny) i obszarze pozamiejskim. Jednak, gdyby z danymi „modelowymi” porównywać jedynie wyniki z sezonu letniego, to różnice w stężeniach pyłu i większości jego składników byłyby niewielkie. Zaskakujące różnice występują jedynie w stężeniach  $\text{SO}_4^{2-}$  i  $\text{NH}_4^+$ . Pewnych różnic należy się spodziewać ze względu na różne miejsca, okresy, aparaturę do badań. Już po tej wstępnej analizie wydaje się jednak, że w południowej Polsce, w obszarach wiejskim i miejskim, jest znacznie mniej składników wtórnego aerozolu nieorganicznego aniżeli w innych miejscach na świecie.

Znajduje to potwierdzenie w danych przedstawionych w tab. 10, z której wynika, że w Zabrze i w Raciborzu udział wtórnego aerozolu nieorganicznego (*NAW*) w pyłe jest mały w odniesieniu do danych z innych rejonów Europy. Nie różni się jednak znacząco od danych uzyskanych w innych obszarach Polski. Zarówno stężenie *NAW* w powietrzu, jak i jego udział w masie pyłu były niższe w sezonie zimowym niż letnim, co też jest ewenementem w skali europejskiej. Prawdopodob-

nie w obu badanych obszarach większy wpływ na kształtowanie stężeń *NAW* ma występowanie w lecie warunków sprzyjających przemianom fotochemicznym gazowych zanieczyszczeń w powietrzu aniżeli emisja gazowych prekursorów.

Tab. 10. Stężenia masowe pyłu drobnego i jego wybranych składników, rejestrowane na niektórych stanowiskach monitoringu jakości powietrza w Europie

Kraj Źródło	Stanowisko	PM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	MM (%)	Na <sup>+</sup> +Cl <sup>-</sup> (%) <sup>b)</sup>	PP (%)	EC+OM (%)	NAW (%) <sup>e)</sup>	MN (%) <sup>k)</sup>
Finlandia [Saarikoski 2008]	Hyytiälä, tło regionalne, V 2004; PM1	4,4	-	-	-	52	41 <sup>a)</sup>	7
	Finokalia, przybrzeżne, VII 2004-VII 2006; PM1	12	-	-	4	30	52 <sup>a)</sup>	14
	Helsinki, miejskie, III 2006-II 2007; PM	21	-	-	-	48	23 <sup>a)</sup>	29
Hiszpania [Pérez i in. 2008]	Barcelona, tło miejskie; PM1	19	5	1	-	45	31	18
	Barcelona, tło miejskie; PM2,5	29	16	2	-	34	30	18
Niemcy [Spindler i in. 2010]	Melpitz, tło pozamiejskie; WEST, lato/zima; PM1 <sup>c)</sup>	10/11	-	-	-	20/18	<35/55	45/27
	Melpitz, tło pozamiejskie; EAST, lato/zima; PM <sup>d)</sup>	17/22	-	-	-	27/25	<32/41	41/27
Niemcy [Gnauk i in. 2005]	Thüringer Wald, tło pozamiej- skie, X 2001; PM0,42-1,2	9,6	-	-	-	24	46	38
Szwajcaria [Hueglin i in. 2005]	Bern, przydrożne, centrum, 1998-1999; PM2,5	24,6	4,8	-	2,2	47,7	40	15,2
	Basel, podmiejskie; 1 rok; PM2,5	18,9	6,6	-	3,6	32,2	49,2	3,8
	Chamont, pozamiejskie; 1 rok; PM2,5	7,7	8,8	-	3,6	26	48,2	13,4
Wielka Brytania [Yin, Harrison 2008]	Birmingham, tło miejskie, wiosna/zima; PM1	12,6 <sup>h)</sup>	5/8 <sup>g)</sup>	1/2	-	31/49	55/41 <sup>h)</sup>	8/0
Włochy [Carbone i in. 2010]	Bologna, wiejskie, lato 2007/zima 2008 <sup>i)</sup>	8,5/20,6	2/0 <sup>g)</sup>	2/0	-	48/43 <sup>j)</sup>	48/56	-
	Rzym, podmiejskie; lato 2007/zima 2008 <sup>l)</sup>	7,7/6,7	6/3 <sup>g)</sup>	5/2	-	62/67 <sup>j)</sup>	27/28	-
Polska [GIOŚ 2011]	Diabla Góra, tło regionalne, lato/zima 2010; PM2,5	8,7/25,9	28/3	11/11	<1/<1	20/40	33/44	18/2
	Gdańsk, tło miejskie, lato/zima 2010; PM2,5	13,1/42,8	14/4	9/6	<1/<1	21/36	20/30	36/24
	Katowice, tło miejskie, la- to/zima 2010; PM2,5	17,3/83,0	14/6	9/6	<1/<1	32/45	33/19	2/24
Polska wyniki z tej pracy	Zabrze, tło miejskie, lato/zima 2009; PM1	20,6/46	9/5	6/6	0.6/0.5	51/67	23/15	10/6
	Racibórz, tło regionalne, lato/zima 2010; PM1	15,5/43,2	5/3	10/6	0.4/0.3	39/64	23/17	22/9

<sup>a)</sup> suma udziału jonów rozpuszczalnych w wodzie;  
<sup>b)</sup> lub oszacowany udział soli morskiej;  
<sup>c)</sup> dane przy napływie mas powietrza z sektora zachod.;  
<sup>d)</sup> dane przy napływie mas powietrza z sektora wschod.;  
<sup>e)</sup> sumaryczny udział aerozolu nieorganicznego wtórnego *NAW*, czyli sumy NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>;  
<sup>f)</sup> średnie stężenie dla całego okresu pomiarowego;  
<sup>g)</sup> suma: pył bogaty w Fe + sole Ca;  
<sup>h)</sup> suma (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>/NaNO<sub>3</sub>);  
<sup>i)</sup> próbki pobierane w dzień;  
<sup>j)</sup> suma WSOM (*water-soluble organic matter*) + WINCM (*water insoluble carbonaceous matter*);  
<sup>k)</sup> materia niezidentyfikowana (*MN*) w tej pracy jest to uśredniony dla każdego z dwóch sezonów (średnia arytmetyczna ze stężeń w przypadających mu miesiącach) wynik odjęcia sumy stężeń *MO*, *EC*, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, *MM* i *PP* od stężenia PM1 w każdym miesiącu.

W sezonie letnim, w miastach Europy od ok. 30% (Wielka Brytania, Hiszpania) do 62% (Włochy) masy PM1 stanowią związki węgla (tab. 10). Suma *OM+EC* w Zabrze, w sezonie letnim mieściła się niemal w środku tego przedziału (51%). W zimie w Europie udział związków węgla w pyłe drobnym jest generalnie większy niż w lecie. Dotyczy to również polskich miast – Zabrze, Katowic, Gdańska. Trzeba jednak podkreślić, że udział związków węgla w masie PM1 w zimie w Zabrze jest wyjątkowo duży. Co ciekawe, tak samo duży udział związków węgla w masie PM1 odnotowano w Raciborzu. W pozostałych obszarach tła regionalnego i obszarach podmiejskich w Europie (z wyjątkiem Włoch) udział *OM* i *EC* jest znacznie mniejszy.

Ponieważ stężenie *OM* w powietrzu zależy od emisji organicznych związków węgla, w tym węglowodorów ze spalania różnych materiałów, a *EC* to głównie pierwotny pył – drobne cząstki sadzy ze spalania, jest oczywiste, że stężenia tych związków w powietrzu są wyższe w sezonie nasilonego spalania paliw kopalnych na terenie całej Polski. Ponieważ z większości źródeł *EC* jest emitowany do powietrza w postaci bardzo drobnych cząstek (o *mass median diameter* ok. 0,2  $\mu\text{m}$  [Japar i in. 1986]), przebywa w atmosferze bardzo długo i może się przemieszczać wraz z innymi związkami (np. zaadsorbowanymi na swojej powierzchni) na spore odległości. Z tego powodu (długi czas przebywania *EC* w powietrzu) również w lecie, zwłaszcza w Zabrze, gdzie w centrum miasta panuje dość intensywny ruch samochodowy, obserwuje się względnie wysokie stężenia *EC*.

Stosunkowo duży udział *OM* w masie PM notowany w sezonie letnim w obu lokalizacjach wskazuje, że ważnymi źródłami *OC* w powietrzu mogą być materia biologiczna i tzw. wtórny aerozol organiczny (nasilone w lecie promieniowanie słoneczne zwiększa intensywność przemian lotnych związków organicznych).

Zarówno w Zabrze, jak i w Raciborzu dość duży udział – większy niż w innych rejonach Europy – mają w masie PM1 chlorki i sól. W sezonie letnim stężenia obu są wyższe w Raciborzu niż w Zabrze, co może być spowodowane powszechniejszym na wsi niż w mieście spalaniem biomasy w lecie (spalanie liści, wypalanie trawy, spalanie drewna w piecach domowych). W sezonie zimowym prawdopodobnym źródłem chlorków i sodu w obu lokalizacjach są paleniska domowe (spalanie niskojakościowego węgla oraz odpadów i śmieci).

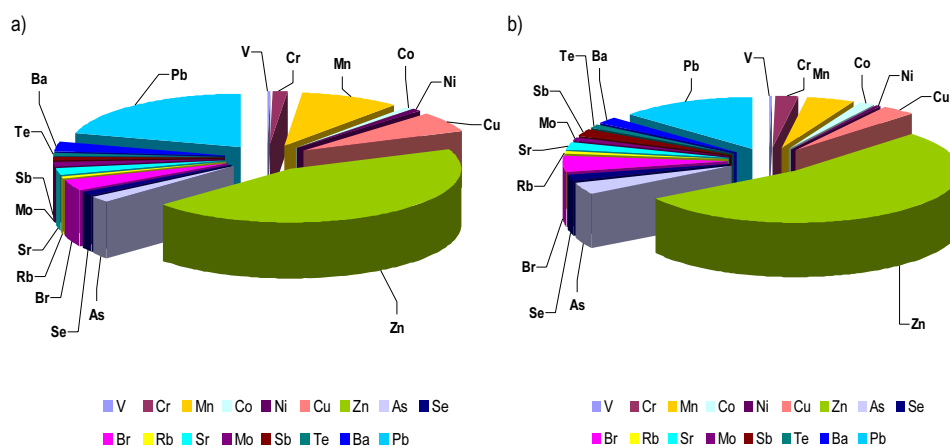
W obu lokalizacjach wyliczone stężenia *MM* są nieco wyższe w zimie niż w lecie, jednak ich udziały w masie pyłu kształtują się już odwrotnie, co bardzo dobrze koresponduje z danymi z innych obszarów (tab. 33) i świadczy o prawidłowym sposobie oszacowania. Średni udział *MM* w masie PM1 jest w obu sezonach niemal dwukrotnie większy w Zabrze niż w Raciborzu. Prawdopodobnie ruch samochodowy w mieście i erozja związanych z nim elementów wpływa na tę sytuację. Ponadto nie można wykluczyć, że na stężenia Al, Si, Ti, Fe, K, Ca Mg, zwłaszcza w miastach, może wpływać również emisja antropogeniczna.

Udział pozostałych pierwiastków (*PP*) w pyłe PM1 w obu punktach pomiarowych jest nieduży (0,3-0,6%) i w obu większy w lecie niż w zimie. W sezonie zimowym stężenia *PP* w powietrzu, w obu punktach są zbliżone, natomiast w sezonie letnim zdecydowanie wyższe stężenia *PP* mają w Zabrze niż w Raciborzu.

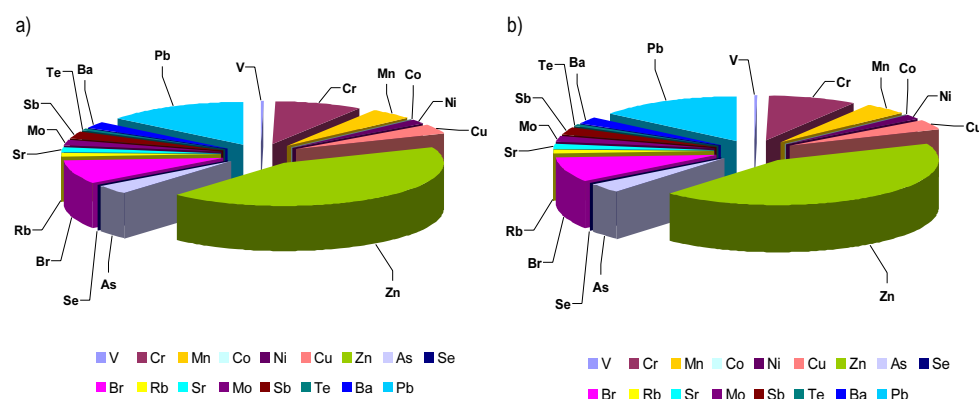


Z udziału poszczególnych pierwiastków śladowych w *PP* widać, że w mieście (w Zabrze) w lecie dominującym źródłem pierwiastków może być komunikacja (rys. 26a i 27a [Chow 1995]). W zimie natomiast, w obu lokalizacjach profil pierwiastkowy jest charakterystyczny dla pyłu ze spalania węgla w paleniskach domowych i kotłach elektrowni (rys. 26b i 27b [Chow 1995]).

Z pomiarów wynika, że przeważająca część masy pyłu drobnego w Zabrze i Raciborzu pochodzi z procesów antropogenicznych (*OM+EC+Na+Cl+PP*) – głównie z procesów spalania. 23% i średnio 16% masy *PM1* w południowej Polsce to *NAW* – cząstki z przemian gazowych prekursorów pyłu w atmosferze, których stężenia oprócz innych warunków (nasłonecznienie, wilgotność powietrza, obecność związków neutralizujących, itd.) zależą przede wszystkim od wielkości emisji, m.in.  $SO_2$  i  $NO_x$  także z procesów spalania. Od 3% (w Raciborzu w zimie) do 9% (w Zabrze w lecie) masy pyłu drobnego pochodzi z procesów naturalnych (gleba).



Rys. 26. Udział pierwiastków śladowych w stężeniu grupy PP (pozostałe pierwiastki) w Zabrze w sezonie letnim (a) i sezonie zimowym (b)



Rys. 27. Udział pierwiastków śladowych w stężeniu grupy PP (pozostałe pierwiastki) w Raciborzu w sezonie letnim (a) i sezonie zimowym (b)

Uzyskane wyniki badań składu chemicznego PM1 wskazują na wysokie ryzyko ekotoksycznych oddziaływań substancji zawartych w badanej frakcji pyłu.

Wysokie stężenia i duża zawartość związków organicznych i stosunkowo małe zróżnicowanie składu chemicznego PM1 w obszarach tła i aglomeracji, wskazuje na wysokie prawdopodobieństwo wzrostu efektów pochłaniania światła słonecznego przez cząstki aerozolu bogatego w węgiel w obszarze południowej części województwa śląskiego.

Skład chemiczny PM1 potwierdza tezę o kluczowej roli procesów spalania w kształtowaniu się poziomu stężeń i składu PM1 w badanym obszarze.

Badania stężeń PM1 i składu chemicznego w punktach pomiarowych zlokalizowanych w rejonach tła regionalnego, co odpowiada wytycznym lokalizacji stacji meteorologicznych I rzędu PSHM IMGW-PIB, umożliwiają lepszą ocenę zasięgu oddziaływania emisji antropogenicznej i mogą być przydatne w ocenie wpływu składu chemicznego atmosfery na efekty klimatyczne w mezoskali.

Rozwój sieci pomiarowej chemizmu atmosfery, a w szczególności składu pyłu PM1 w obszarach tła może być przydatny w badaniach wpływu emisji antropogenicznych na zmiany klimatu.

## 5. Wpływ warunków meteorologicznych na właściwości aerozoli – analiza epizodu pyłowego

Jak przedstawiono w rozdziale *Pogoda chemiczna a meteorologia*, w latach 2006-2010 w Polsce zaobserwowano łącznie 6 dni epizodów globalnych. Sytuacja, która zaistniała w dniach 23-27 stycznia 2010 r. była drugą pod względem wielkości stężeń zanieczyszczeń w tym okresie. Według klasyfikacji zaproponowanej w niniejszej pracy na większości stacji PMŚ był to epizod III i IV stopnia (średnie dobowe stężenia PM10 > 150 µg/m<sup>3</sup>). Poniżej przedstawiono przebieg stężeń zanieczyszczeń pyłowych na tle przebiegu warunków meteorologicznych na stacjach w Zabrze i Raciborzu.

Maksymalne stężenie średniodobowe zanotowane na analizowanych wybranych stacjach monitoringu jakości powietrza w Polsce wyniosło 498 µg/m<sup>3</sup>, co stanowiło przekroczenie o 896% stężenia dopuszczalnego. Natomiast maksymalne dobowe stężenie na stacji w Zabrzu podczas epizodu w styczniu 2010 r. przekroczyło o 392%, a w Raciborzu o 672% stężenia dopuszczalne.

Tab. 34. Średnie 24-godzinne stężenia PM10 (µg/m<sup>3</sup>) na wybranych stacjach\* w Polsce podczas epizodu w styczniu 2010 r. (źródło GIOŚ/PMŚ)

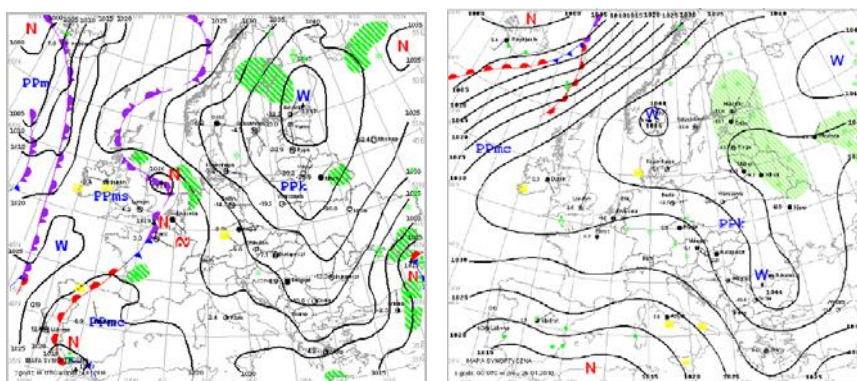
Lp.	Stacja	22.1	23.1	24.1	25.1	26.1	27.1	28.1	Średnia 23-27.1	Min/50	Max/50
1.	Gorlice	39	265	-	283	<b>498</b>	266	67	328	5,3	10,0
2.	Jelenia Góra-Cieplice	127	263	382	242	351	<b>481</b>	22	344	4,8	9,6
3.	Kłodzko	71	243	<b>445</b>	380	295	194	26	311	3,9	8,9
4.	Żywiec	72	247	360	377	<b>408</b>	253	14	329	4,9	8,2
5.	Nowy Sącz	53	247	<b>388</b>	383	378	-	102	349	4,9	7,8
6.	Szczawno-Zdrój	91	239	<b>388</b>	161	302	165	46	251	3,2	7,8
7.	Racibórz	91	184	325	<b>386</b>	299	282	23	295	3,7	7,7

Lp.	Stacja	22.1	23.1	24.1	25.1	26.1	27.1	28.1	Średnia 23-27.1	Min/50	Max/50
8.	Kraków Nowa Huta	54	87	101	182	225	<b>381</b>	109	195	1,7	7,6
9.	Gorzów Wielkopolski	142	194	177	189	356	<b>364</b>	24	256	3,5	7,3
10.	Wodzisław Śląski	59	118	135	213	329	<b>360</b>	50	231	2,4	7,2
11.	Wadowice	54	135	181	275	329	<b>350</b>	26	254	2,7	7,0
12.	Tarnów	54	107	123	244	<b>348</b>	331	56	231	2,1	7,0
13.	Bielsko-Biała	59	188	240	270	<b>337</b>	269	49	261	3,8	6,7
14.	Bochnia	58	119	150	233	270	<b>283</b>	33	211	2,4	5,7
15.	Głubczyce	88	134	197	<b>272</b>	191	167	68	192	2,7	5,4
16.	Kędzierzyn-Koźle	66	145	<b>267</b>	266	251	253	39	236	2,9	5,3
17.	Warszawa Targówek	57	101	146	199	<b>250</b>	143	46	168	2,0	5,0
18.	Zabrze	54	94	135	196	220	<b>246</b>	26	178	1,9	4,9
19.	Wrocław (Wierzbowa)	76	105	105	128	225	<b>239</b>	26	160	2,1	4,8
20.	Opole	59	112	144	157	190	<b>236</b>	42	168	2,2	4,7
21.	Poznań (Polanka)	68	99	97	110	182	<b>199</b>	34	137	1,9	4,0
22.	Warszawa Ursynów	57	68	97	141	<b>188</b>	138	36	126	1,4	3,8
23.	Toruń	64	-	-	136	<b>180</b>	108	32	141	2,2	3,6
24.	Zakopane	81	159	114	128	133	<b>174</b>	81	142	2,3	3,5
25.	Gdańsk Wrzeszcz	51	66	82	<b>125</b>	103	42	30	84	0,8	2,5

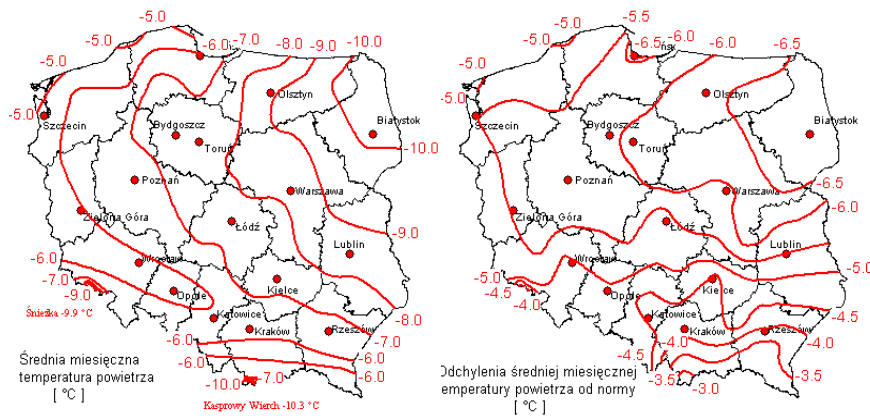
\* Wyniki pochodzą z pomiarów automatycznych, z wyjątkiem stacji w Raciborzu, gdzie pomiary były manualne

#### Sytuacja synoptyczna w II połowie stycznia 2010 r.

W dniach 13-26 stycznia 2010 r. nad Polską dominował bardzo silny i stabilny układ wysokiego ciśnienia, który klinem sięgał po Skandynawię, a przejściowo także Europę Zachodnią. Z północnego wschodu napływała mroźna polarno-kontynentalna masa powietrza. Początkowo występowało zachmurzenie duże i słabe opady śniegu, a od 20 stycznia przeważało zachmurzenie małe i umiarkowane. W nocy i nad ranem tworzyły się mgły marznące i osadzające sadź. Wiatr był przeważnie słaby, okresami umiarkowany, wschodni. Od dnia 27 stycznia do końca miesiąca Polska znajdowała się pod wpływem układów niżowych z frontami atmosferycznymi [Biuletyn PSHM 2010].



Rys. 28. Mapa synoptyczna 24 i 26 stycznia 2010 r., godz. 00 UTC (źródło: IMGW-PIB)



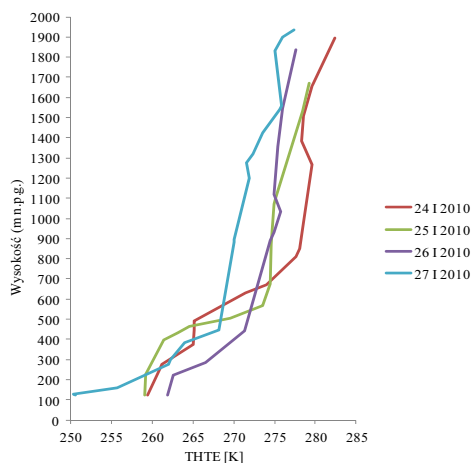
Rys. 29. Średnia miesięczna temperatura powietrza w styczniu 2010 i jej odchylenie od normy z okresu 1971-2000 [Biuletyn PSHM 2010]

Na większości stacji meteorologicznych IMGW-PIB średnia miesięczna temperatura powietrza i średnia w trzeciej dekadzie stycznia 2010 r. była znacznie poniżej normy, tj. poniżej  $-2,0^{\circ}\text{C}$ .

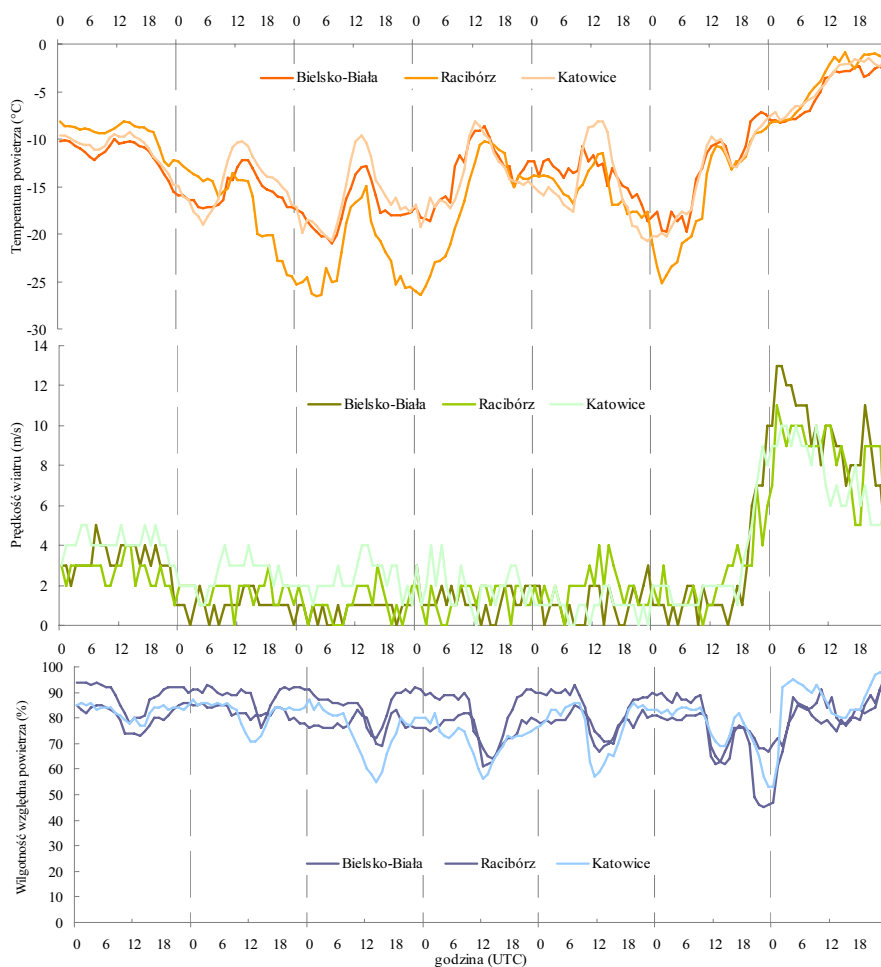
#### Warunki meteorologiczne w województwie śląskim

W dniach 23-26 stycznia 2010 r. w województwie śląskim wiał słaby wiatr zmienny, którego prędkość maksymalna w Katowicach nie przekraczała 4 m/s, a w Bielsku i Raciborzu 2 m/s. W godzinach nocnych i porannych na wielu stacjach notowano ciszę.

Maksymalna temperatura powietrza wahała się od  $-6^{\circ}\text{C}$  w dniu 21 stycznia w Raciborzu do  $0^{\circ}\text{C}$  29 stycznia w Katowicach. Minimalna dobowa temperatura powietrza notowana była nad ranem 24.01.2010 w Raciborzu ( $-26,9^{\circ}\text{C}$ ). Trajektorie wsteczne uzyskane przy użyciu modelu HYSPLIT [Draxler i in. 2010; Rolph 2010] pokazują, że powietrze nad południową Polskę 24 stycznia o godz. 00 UTC napłynęło z obszaru północnej i środkowej Ukrainy. Nad całym obszarem wo-



Rys. 30. Pionowy profil temperatury pseudo-potencjalnej we Wrocławiu, 0 UTC

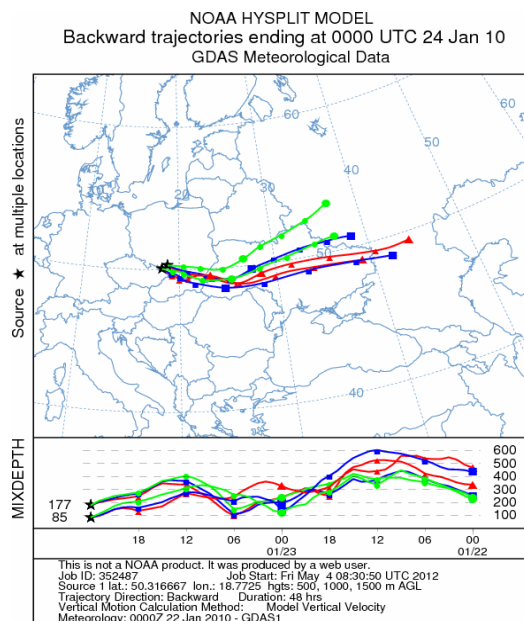


Rys. 31. Przebieg temperatury powietrza, prędkości wiatru i wilgotności względnej powietrza od 22 do 28 stycznia 2010 na stacjach meteorologicznych w woj. śląskim

Tab. 35. Typy cyrkulacji atmosfery podczas epizodu w styczniu 2010 roku

Data	Typy cyrkulacji				Masa powietrza*	Front atmosferyczny
	według Lityńskiego		według Niedźwiedzia			
	Symbol	Opis typu	Symbol	Opis typu		
22.01.2010	SEa	południowo-wschodni antycyklonalny	Ea	wschodni antycyklonalny	PPk	-
23.01.2010	SEa	południowo-wschodni antycyklonalny	SEa	południowo-wschodni antycyklonalny	PPk	-
24.01.2010	Ea	wschodni antycyklonalny	SEa	południowo-wschodni antycyklonalny	PPk	-
25.01.2010	Ea	wschodni antycyklonalny	SEa	południowo-wschodni antycyklonalny	PPk	-
26.01.2010	SEa	południowo-wschodni antycyklonalny	Ea	wschodni antycyklonalny	PPk	-
27.01.2010	Sa	południowy antycyklonalny	Ka	wał wyżowy	PPk	-
28.01.2010	0 <sub>c</sub>	zerowy cyklonalny (centrum niżu)	Wc	zachodnia cyklonalna	PPms	okluzji

\* PPK – powietrze polarne kontynentalne, PPms – powietrze polarne morskie stare



Rys. 32. Trajektorie wsteczne mas powietrza na wysokościach 500 m n.p.g. (czerwona), 1000 m n.p.g. (niebieska), 1500 m n.p.g. (zielona) i wysokość warstwy mieszania wyznaczone przy wykorzystaniu modelu HYSPLIT w odniesieniu do Zabrza i Raciborza na 24 stycznia 2010 r. godz. 0 UTC

jewództwa śląskiego utrzymywała się całodobowa inwersja temperatury, której miąższość określona na podstawie danych sondażu aerologicznego we Wrocławiu wynosiła od 400 do 700 m nad poziomem gruntu (rys. 30).

Wyliczony na podstawie danych ze stacji meteorologicznej na Lysej Horze w Beskidzie Śląsko-Morawskim i w Ostravie – Mosnovie ujemny pseudogradient temperatury (inwersja temperatury) występował od godz. 2 UTC w dniu 23 stycznia do godziny 8 UTC 25 stycznia i wynosił średnio  $\gamma = -0,5$  K/100 m [Błażek i in. 2010]. Utrzymująca się 25 stycznia słaba inwersja ( $\gamma \approx -0,2$  K/100 m) zakończyła się wraz nasunięciem się frontu atmosferycznego w dniu 27 stycznia 2010 r. Tego dnia południowa Polska znalazła się pod wpływem układu niżowego z frontem okluzji. Nastąpił bardzo szybki spadek ciśnienia atmosferycznego, w efekcie czego wzrosła prędkość wiatru, która pod koniec doby na południu regionu w porywach osiągała 17 m/s. Tego dnia występowały też opady śniegu, co w połączeniu z silniejszym wiatrem powodowało lokalne zamiecie śnieżne.

Z meteorologicznego punktu widzenia sytuacje z wysokim stężeniami zanieczyszczeń powietrza można podzielić na trzy fazy:

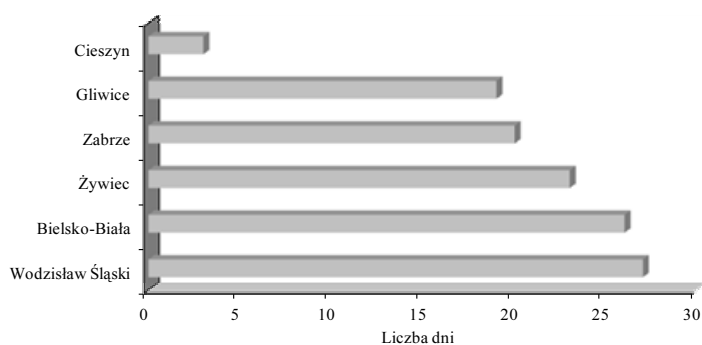
- Fazę umacniania się układu wyżowego charakteryzującą się stopniowym spadkiem temperatury powietrza i prędkości wiatru oraz lekkim wzrostem ciśnienia atmosferycznego. W tej fazie wzrasta stabilność atmosfery przez umacnianie się inwersji. W okresie tym dominuje wyraźny napływ powietrza ze wschodu. Faza ta trwała od około godz. 00 UTC 22 stycznia i do godzin nocnych 24 stycznia.
- Fazę stabilizacji charakteryzującą się dobowymi wahaniami temperatury i spadkiem prędkości wiatru aż do wystąpienia ciszy. W tej fazie warstwa inwersyjna jest już ukształtowana i ulega tylko niewielkim wahaniom dobowym.

W tym okresie obserwuje się słaby napływ powietrza ze wschodu lub całkowitą stagnację. Faza ta kończy się w godzinach popołudniowych 27 stycznia.

- Fazę zaniku wyżu i dostawania się regionu pod wpływ zatoki niżowej z frontem atmosferycznym. Faza ta charakteryzuje się szybkim wzrostem temperatury powietrza, stopniowym wypływaniem inwersji aż do jej zaniku i wzrostem prędkości wiatru. Nad obszar województwa śląskiego zaczyna napływać powietrze z zachodu.

#### *Jakość powietrza na stacjach monitoringu w województwie śląskim*

Na większości stacji monitoringu jakości powietrza w południowej i centralnej części województwa śląskiego zanotowano w styczniu 2010 r. dużą liczbę dni z przekroczeniami dopuszczalnego dobowego stężenia pyłu PM10 (rys. 33).

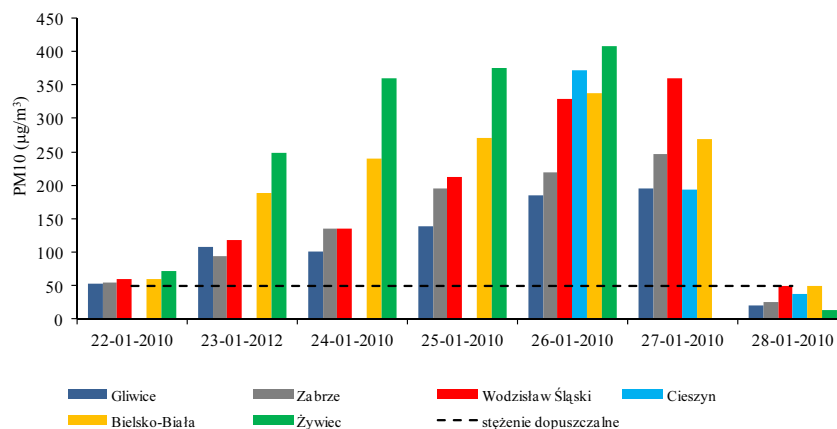


Rys. 33. Liczba dni z przekroczeniem dobowego poziomu dopuszczalnego PM10 w styczniu 2010 r.

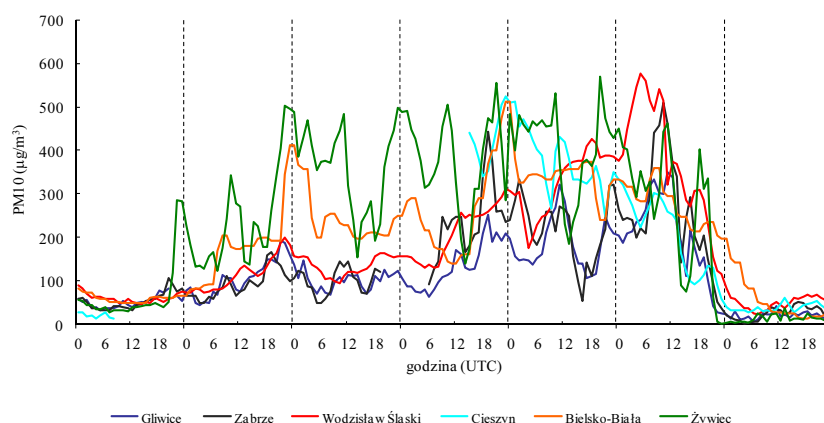
W przebiegu miesięcznym stężeń PM10 zaobserwowano trzy znacznie większe epizody podwyższonych poziomów (4-8 stycznia, 16-19 stycznia, 23-27 stycznia). Podczas ostatniego najwyższe średnie dobowe stężenie pyłu PM10 obserwowano w Żywcu (od 247  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  23 stycznia do 408  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  26 stycznia). Stężenia średnie dobowe powyżej 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  mierzono również w Zabrze, Bielsku-Białej, Wodzisławiu Śląskim i sporadycznie w Cieszynie.

Maksymalne notowane wartości jednogodzinne to od 194  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (26 stycznia, godz. 21-23 czasu urzędowego) do 576  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (27 stycznia, godz. 5). Interesujący był przebieg stężeń chwilowych PM10 w Wodzisławiu Śląskim – rosły systematycznie od 22 do 27 stycznia bez charakterystycznego dobowego przebiegu stężeń.

Na obszarze województwa śląskiego w analizowanym okresie rejestrowano ponadto przekroczenia wartości 125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , tj. dopuszczalnego średniego dobowego stężenia dwutlenku siarki SO<sub>2</sub>. Największe przekroczenie wystąpiło 26 stycznia w Żywcu (256  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Mniejsze przekroczenia rejestrowano 25 stycznia w Cieszynie (198  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) i Zabrze (138  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 26 stycznia w Rybniku (161  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) i Tychach (129  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) oraz 27 stycznia w Dąbrowie Górniczej (139  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Przekroczeniom średniego dobowego poziomu dopuszczalnego SO<sub>2</sub> towarzyszyły także przekroczenia 1-godzinnych stężeń dopuszczalnych tej substancji, tj. 350  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , osiągając w Żywcu maksymalnie 407  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (25 stycznia, godz. 10).



Rys. 34. Średnie dobowe stężenie PM10 na stacjach monitoringu jakości powietrza od 22 do 28 stycznia 2010 r.



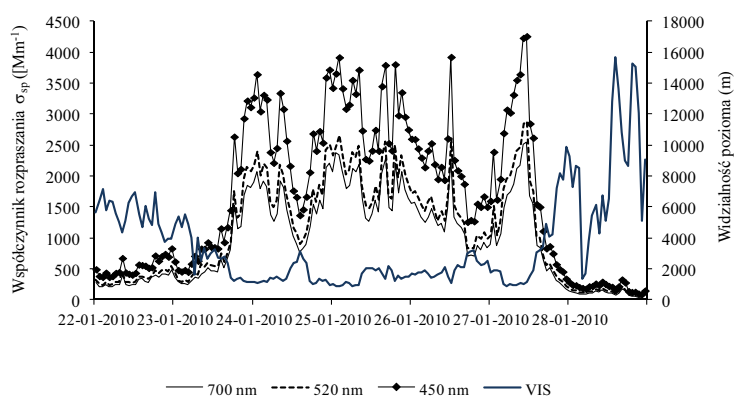
Rys. 35. Stężenie 1-godzinne PM10 na stacjach monitoringu jakości powietrza od 22 do 28 stycznia 2010 r.

26 stycznia o godz. 22 na stacji monitoringowej w Katowicach zarejestrowano wysokie 1-godzinne stężenie dwutlenku azotu  $\text{NO}_2$ , osiągające poziom 99% dopuszczalnej normy  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Natomiast dzień wcześniej na południu województwa występowały podwyższone 8-godzinne stężenia tlenku węgla CO w powietrzu, dochodzące do poziomu 60% normy  $10\ 000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  w Cieszynie i Bielsku-Białej.

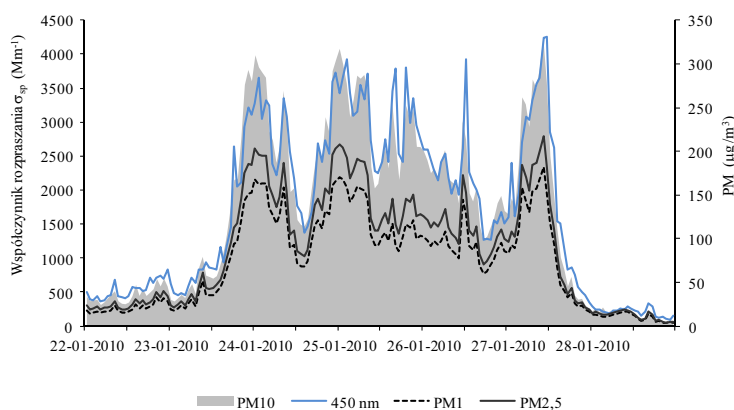
Jakość powietrza atmosferycznego, szczególnie stężenie pyłu zawieszonego, w województwie śląskim w warunkach zimowych jest związana przede wszystkim z niezorganizowaną emisją komunalną. Obserwowany epizod wysokich stężeń zanieczyszczeń w styczniu 2010 r. był jednym z poważniejszych tego typu przypadków w ostatnich latach. Pod względem wysokości stężeń maksymalnych ustępował jednak epizodowi ze stycznia 2006 r., choć wyróżniał się tym, że zaistniał na tle długotrwałych przekroczeń dopuszczalnych stężeń dobowych. Sytuacja z wysokimi stężeniami zanieczyszczeń w styczniu 2010 r. była związana z długotrwałym



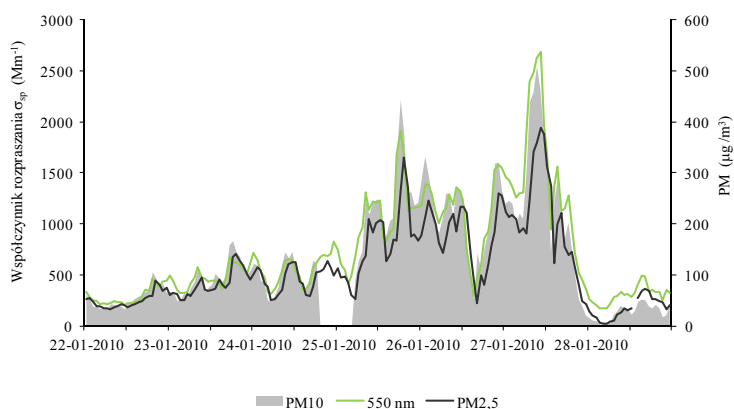
występowaniem niskiej temperatury spotęgowanym umocnieniem się silnego układu wyżowego. W takich warunkach, oprócz zwiększonej emisji komunalnej, istotne znaczenie miały też wybitnie niekorzystne warunki rozprzestrzeniania zanieczyszczeń (słaby wiatr lub cisza atmosferyczna, inwersja temperatury nad całym obszarem, izotermia, niska wysokość warstwy mieszania, stabilny układ wysokiego ciśnienia atmosferycznego).



Rys. 36. Zależność 1-godzinnego współczynnika rozpraszania światła od widzialności w okresie 22-28 stycznia 2010 roku dla różnych długości fal w Raciborzu



Rys. 37. Zależność 1-godzinnego współczynnika rozpraszania światła dla długości fali 450 nm od stężeń zanieczyszczeń pyłu zawieszonego PM frakcji 1, 2,5 i 10 w okresie 22-28 stycznia 2010 roku w Raciborzu

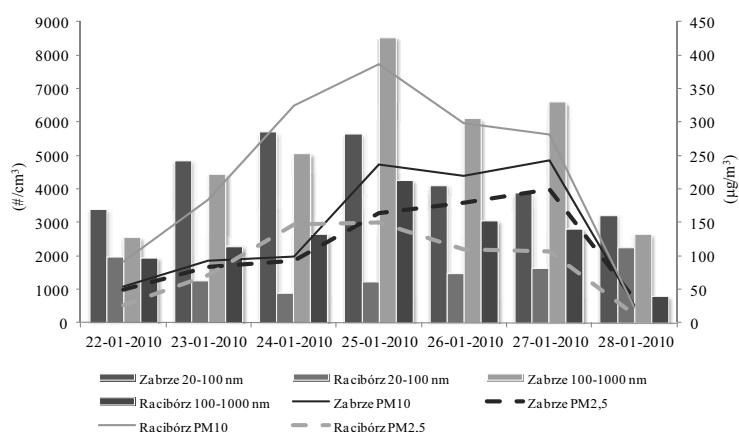


Rys. 38. Zależność 1-godzinnego współczynnika rozpraszania światła dla długości fali 550 nm od stężeń zanieczyszczeń pyłu zawieszonego PM frakcji 2,5 i 10 w okresie 22-28 stycznia 2010 roku w Zabrze

### Charakterystyka właściwości pyłu zawieszonego podczas epizodu na stacjach w Zabrzju i Raciborzu

Prowadzone w okresie występowania omawianego epizodu w Zabrzju i Raciborzu badania liczebności cząstek ultradrobnych i drobnych przy wykorzystaniu licznika TSI 3031 pozwalają na scharakteryzowanie cząstek aerozoli obecnych w przyziemnej warstwie atmosfery w tym okresie.

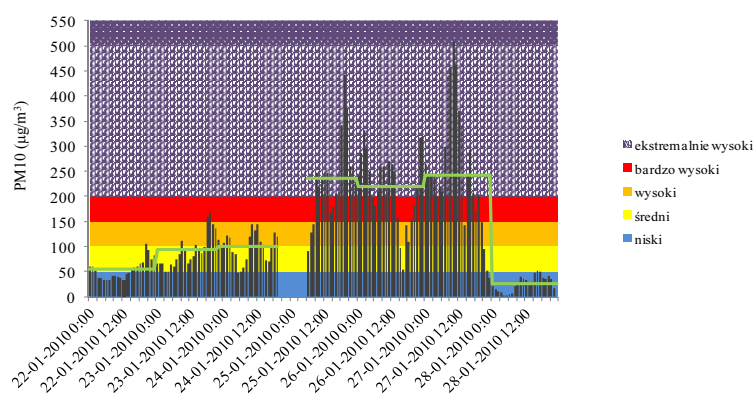
Analiza rocznego przebiegu zmienności stężeń liczbowych cząstek drobnych i ultradrobnych wykazuje znaczące zróżnicowanie ich składu w obszarze Aglomeracji Górnośląskiej i w rejonie tła – w Raciborzu. Wspomniane różnice wystąpiły, także podczas sytuacji z wysokimi stężeniami pyłu zawieszonego. W okresie poprzedzającym wystąpienie epizodu w Raciborzu – od początku stycznia w zakresie 20-1000 nm uwidoczniła się znacząca dominacja liczebności frakcji 200-1000 nm (jej znaczącym źródłem jest emisja ze spalania paliw w gospodarstwach domowych). W Zabrzju, oprócz cząstek emitowanych w procesach spalania w gospodarce komunalnej, obserwuje się znaczący udział cząstek poniżej 200 nm, których pochodzenie należy wiązać w zdecydowanej większości z emisją ze spalania paliw w silnikach samochodowych.



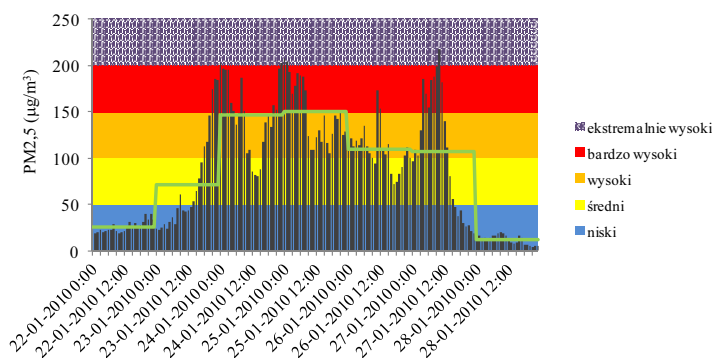
Rys. 39. Przebieg zmienności stężeń PM10 i PM2,5 oraz liczebności cząstek drobnych i ultradrobnych w trakcie epizodu wysokich stężeń PM w styczniu 2010 w Zabrzju i Raciborzu

W okresie epizodu w Raciborzu odnotowano prawie 3-krotny przyrost liczebności frakcji cząstek drobnych w stosunku do ultradrobnych. W Zabrzju liczebność w całym zakresie pomiarowym była 3-krotnie większa niż w Raciborzu. Natomiast stosunek liczebności cząstek z przedziału 20-100 nm i 100-1000 nm nawet w chwili występowania maksymalnych stężeń PM nie przekroczył 2. Analiza przebiegu zmienności stężeń PM2,5 i PM10 dla obu lokalizacji oraz zmian liczebności cząstek drobnych i ultradrobnych wskazuje na odmienne mechanizmy powodujące występowanie ekstremalnych stężeń. Stężenia frakcji PM2,5 i PM10 w Raciborzu znacznie się różnią, a w Zabrzju są zbliżone, co wskazuje na dominację cząstek o małych średnicach w masie pyłu PM10 (rys. 39). Można to wiązać ze zwiększo-

ną akumulacją cząstek ultradrobnych w Zabrze w obrębie miejskiej wyspy ciepła (co może tłumaczyć dużą liczebność cząstek drobnych i ultradrobnych) i ich wpływem na wysokość stężeń PM10 i PM2,5. W Raciborzu na poziom stężeń w istotny sposób wpływały pyły o średnicach powyżej 1000 nm, prawdopodobnie z emisji z rozproszonych niskich komunalnych źródeł spalania węgla o dużej zawartości popiołu. Źródła te, w odróżnieniu od dużych instalacji energetycznego spalania obecnych w centralnej części aglomeracji, emitują dużo pyłów w zakresie frakcji PM10.



Rys. 40. Średnie dobowe (linia) i chwilowe stężenie (słupki) PM10 na tle wskaźnika jakości powietrza PMI od 22 do 28 stycznia 2010 r. w Zabrze

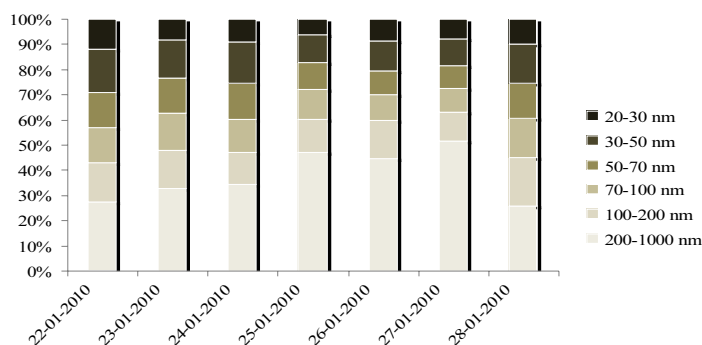


Rys. 41. Średnie dobowe (linia) i chwilowe stężenie (słupki) PM2,5 na tle wskaźnika jakości powietrza PMI od 22 do 28 stycznia 2010 w Raciborzu

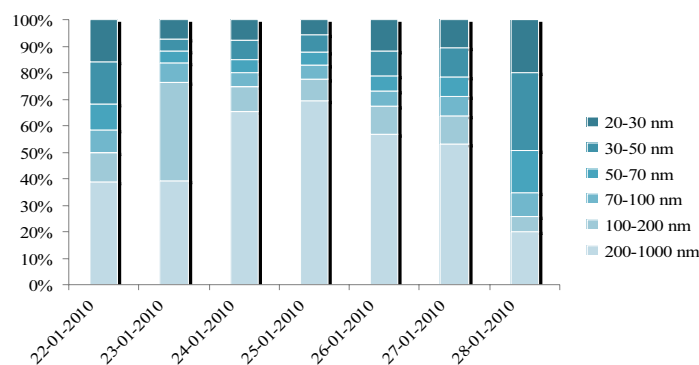
Z uwagi na lokalizację stacji pomiarowej w Raciborzu, w warunkach stagnacji atmosferycznej i braku znaczących efektów związanych z lokalną wyspą ciepła, jak w Zabrze, mniejsza wysokość warstwy mieszania skutkowałą występowaniem wysokich stężeń pyłów frakcji 2,5 µm i wyższych, które przy braku mechanizmów wmywania potrafią długo utrzymywać się w atmosferze.

W Zabrze duże liczebności cząstek ultradrobnych są związane zarówno z procesami spalania (samochody, gospodarka komunalna), jak i procesami generowania cząstek w wyniku przemian fizykochemicznych prekursorów gazowych, obec-

nych w atmosferze aglomeracji, i ich kumulacji w obrębie warstwy mieszania, zwłaszcza w okresach, gdy mimo niskiej temperatury w strefie oddziaływania wyżu występuje wysokie nasłonecznienie (rys. 40-43).



Rys. 42. Zmienność średnich 1-godzinnych liczebności cząstek od 22 do 28 stycznia 2010 w Zabrze



Rys. 43. Zmienność średnich 1-godzinnych liczebności cząstek od 22 do 28 stycznia 2010 w Raciborzu

Stwierdzone w obu lokalizacjach w trakcie epizodu duże liczebności pyłów drobnych i ultra drobnych, zwłaszcza frakcji 100-1000 nm, ze wskazaniem na spalanie paliw jako ich źródła, powoduje, że wysokie ryzyko narażenia zdrowia ludzi ekspozowanych przez długi okres na ich oddziaływanie. Pyły z tego zakresu głęboko penetrują w układ oddechowy i mogą spowodować niewydolność oddechową, co bezpośrednio zagraża zdrowiu osób z grup wysokiego ryzyka (dzieciom, osobom starszym, osobom z chorobami układu oddechowego i układu krążenia).

#### Podsumowanie

Epizod wysokich stężeń pyłu PM w dniach 23-27 stycznia 2010 r. był drugim co do zasięgu i wartości stężeń zdarzeniem tego typu w Polsce w latach 2006-2010 i jednocześnie pierwszym, podczas którego było możliwe tak kompleksowe badanie wpływu warunków meteorologicznych na stężenia pyłu na Śląsku przy użyciu nowoczesnych przyrządów pomiarowych. Wyniki badań potwierdziły znaczny wpływ warunków meteorologicznych na jego powstanie oraz dominujący w skła-

dzie granulometrycznym udziałem cząstek drobnych nad ultradrobny. Potwierdzają to zarówno badania nefelometryczne, jak i analiza liczebności cząstek. Świadczy to niewątpliwie o znacznym udziale produktów spalania ze źródeł komunalnych.

Interesujący jest też różny przebieg epizodu w Zabrze i Raciborzu. W Zabrze przebieg stężenia pyłu każdej badanej frakcji był typowy, tzn. ich stężenie narastało stopniowo wraz z pogłębianiem się stagnacyjnych warunków atmosfery, natomiast w Raciborzu stężenia po szybkim wzroście utrzymywały się na podobnym poziomie przez cały czas trwania epizodu. W tym przypadku obserwowano wyraźny dobowy przebieg zarówno stężeń, jak i współczynnika rozpraszania. Odmienne w obu miejscach mechanizm wynika prawdopodobnie z różnych właściwości fizycznych atmosfery nad miastem i w obszarze pozamiejskim, a także być może z odmiennej struktury przestrzennej emisji. Wymaga to jednak dalszych badań.

## **6. Badania eksperymentalne pyłu drobnej frakcji – podsumowanie**

Trwająca ponad rok kampania pomiarowa pozwoliła na zgromadzenia bogatego materiału badawczego. Z uwagi na obszerność zbiorów danych, przedstawione w niniejszym opracowaniu dane i spostrzeżenia to w dalszym ciągu wstępne analizy. Analizy danych pomiarowych, badania i pomiary będą prowadzone w przyszłości, w miarę możliwości technicznych, w celu zapewnienia tzw. trwałości projektu.

Analiza istniejącego systemu pomiarów jakości powietrza wskazuje, że system przystosowany do oceny powietrza w strefach zlokalizowanych zgodnie z wymogami dyrektywy 2008/50/WE spełnia swoje funkcje w kontekście oceny narażenia populacji i ekosystemów wrażliwych. Natomiast w kontekście badań zmian klimatu i monitorowania długookresowych zmian w składzie fizykochemicznym atmosfery, pełni jedynie funkcję uzupełniającą. Z uwagi na częste zmiany konfiguracji sieci, dominującą rolę stanowisk miejskich, ograniczony do wymogów dyrektywy zakres badań, ograniczoną rolę pomiarów meteorologicznych, nie może stanowić docelowego rozwiązania w zakresie monitorowania tych efektów.

Badania na stacjach pomiarowych w Zabrze i Raciborzu przy użyciu dedykowanego sprzętu do badań składu frakcyjnego i efektów radiacyjnych powodowanych przez aerozole potwierdziły pełną przydatność tego typu aparatury do badań powiązanych z monitorowaniem czynników wpływających na efekty klimatyczne.

Badania wykazały istotne różnice w składzie fizykochemicznym atmosfery w obszarach zurbanizowanych i w terenach podmiejskich. Analiza danych z obszaru aglomeracji wskazuje na konieczność lepszego poznania czynników wpływających na skład fizykochemiczny atmosfery w układach metropolitalnych, jakim jest aglomeracja górnośląska. Przebieg procesów, skład chemiczny oraz specyficzne cechy związane z termodynamiką atmosfery w tym obszarze wymagają lepszego udokumentowania. Jest to szczególnie istotne w kontekście coraz większej urbanizacji terenu, dynamicznych zmian struktury emisji, a w konsekwencji istotnych zmian stężeń i rozkładów przestrzennych drobnych i ultradrobnych frakcji aerozoli.

Wzrost liczebności aerozoli, w połączeniu ze znaczącymi emisjami ciepła i pary wodnej przy niekorzystnym układzie warunków mikroklimatycznych (wyspa ciepła) może w konsekwencji potęgować negatywne zjawiska ekstremalne, czego przykładem są odnotowywane ekstremalne sytuacje w zakresie jakości powietrza zimą, czy występowanie gwałtownych zjawisk burzowych.

Pełne poznanie i opis matematyczny procesów w atmosferze zachodzących w tych obszarach wymaga stworzenia infrastruktury do badań składu fizykochemicznego atmosfery, łącznie z badaniem ich pionowego profilu. Zadanie to powinno być kontynuacją niniejszego projektu, gdyż wykracza poza ramy obecnie istniejących systemów monitorowania atmosfery w Polsce.

Przez analogię do sytuacji i skali problemów emisyjnych, urbanizacji, stanu jakości powietrza w Aglomeracji Górnośląskiej należy oczekiwać, że w innych aglomeracjach (warszawskiej, łódzkiej, trójmiejskiej, krakowskiej) będą występować podobne zjawiska. Mimo, że daleko tym obszarom do kategorii tzw. mega miast, problemy z jakością powietrza i konsekwencje mikro- i makroklimatyczne oddziaływania na rejony sąsiednie powinny być przedmiotem wnikliwych analiz.

Badania PM<sub>1</sub> wskazują jak istotną rolę mogą odgrywać poznanie i analiza składu chemicznego atmosfery w ocenie źródeł pochodzenia zanieczyszczeń, a w konsekwencji w kształtowaniu racjonalnej polityki w zakresie ochrony powietrza.

Badania wykazały istotną rolę pierwiastka C w kształtowaniu profilu chemicznego pyłu. Znaczący udział węgla organicznego/elementarnego w pyłe wskazuje na procesy spalania, jako odpowiedzialne za złą jakość powietrza. Skład pierwiastkowy frakcji PM<sub>1</sub>, w zakresie pierwiastków charakterystycznych dla spalania węgla i biomasy potwierdza ich kluczową rolę w kształtowaniu się stężeń PM w obszarze nie tylko aglomeracji górnośląskiej, a także w rejonach pozamiejskich.

Spalanie paliw kopalnych uwidacznia się w składzie jonowym PM<sub>1</sub> – występuje szereg wtórnych produktów przemian gazowych prekursorów cząstek stałych w powietrzu. Badania wykazały, że konieczna jest znacząca redukcja emisji w obszarze energetyki komunalnej w celu wyeliminowani lub znaczącego ograniczenia spalania paliw stałych w instalacjach o niskich sprawnościach, bez możliwości kontroli emisji pyłu, związków siarki i azotu oraz o ograniczonej zdolności dopalania węgla.

Badania wykazują, że niezależnie od spalania paliw w celach grzewczych wpływającego na stan jakości powietrza w sezonie zimowym, w obszarach miejskich i w obszarach tła uwidacznia się relatywnie wysoka emisja ze spalania paliw w silnikach samochodowych. Wzrost liczby pojazdów i wynikający z ich średniego wieku zły stan techniczny wskazują na ryzyko narastania problemów z jakością powietrza w okresie letnim, w szczególności w kontekście wtórnych zanieczyszczeń – ilustrują to wyniki badania cząstek ultradrobnych, oraz ozonu w obszarach podmiejskich w sezonie letnim.

Wtórne produkty przemian zanieczyszczeń emitowanych w obszarach miejskich, zwłaszcza w okresie letnim, będą w niedalekiej przyszłości istotnym czynnikiem ryzyka środowiskowego i zdrowotnego w dużych aglomeracjach i na terenach sąsiadujących oraz istotnym składnikiem w bilansie efektów klimatycznych.

Z tego powodu wskazane jest utworzenie niezbędnej infrastruktury do badań i prognozowania skutków emisji antropogenicznej w aglomeracjach i obszarach tła, opartej na nowych technologiach badania składu fizykochemicznego atmosfery, przetestowanych w ramach niniejszego projektu. Badania składu fizykochemicznego atmosfery oraz szczegółowa prognoza zjawisk ekstremalnych w obszarach dużych aglomeracji powinny być stałym elementem osłony meteorologicznej kraju.

#### Literatura

- Aurora-3000, 3 Wavelength Nephelometer, User Manual Version: 1:1, Ecotech, October 2008
- Barone T.L., Zhu Y., 2008, The morphology of ultrafine particles on and near major freeways, *Atmos. Environ.* 42, 6749-6758
- Biuletyn PSHM 2010: Biuletyn PSHM styczeń 2010, 1(86), IMGW Warszawa
- Blažek Z. i in. (w tym Krajny E., Ošrůdka L.), 2010, Smogová situace v oblasti Ostravsko-Karvinska ve dnech 23-27. ledna 2010, *Meteorologické Zprávy (Meteorological Bulletin)*, ČHMÚ (Czech Hydrometeorological Institute), 63, 2, 33-41
- Cabada J.C. i in., 2004, Mass size distributions and size resolved chemical composition of fine particulate matter at the Pittsburgh Supersite, *Atmos. Environ.* 38, 3127-3141
- Carbone C. i in., 2010, Size-resolved aerosol chemical composition over the Italian Peninsula during typical summer and winter conditions, *Atmos. Environ.* 44, 5269-5278
- Charron, A., Harrison, R.M., 2003: Primary particle formation from vehicle emissions during exhaust dilution in the roadside atmosphere. *Atmospheric Environment* 37, 4109-4119
- Chen L.-W. A., Watson J.G., Wang X., 2011, Visibility Monitoring and Standards for Lake Tahoe Basin: Assessment of Current and Alternative Approaches. Final Report, July 20
- Chow J.C., 1995, Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles, *Journal of the Air and Waste Management Association* 45: 320-382
- CLRTAP, 1979, Convention on Long-range Transboundary Air Pollution
- COST 633, 2009, Final Report. Particulate Matter – Properties Related to Health Effects, 2 May
- Cyrys J. i in., 2003, Comparison between different traffic-related particle indicators: Elemental carbon (EC), PM<sub>2,5</sub> mass, and absorbance, *J. of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 13: 134-143
- de Kok T.M.C.M. i in., 2005, Genotoxicity and physicochemical characteristics of traffic-related ambient particulate matter. *Environmental and Molecular Mutagenesis.*, 46, 71-80
- Di Filippo P. i in. 2010, Air pollutants and the characterization of the organic content of aerosol particles in a mixed industrial/semi-rural area in central Italy, *Atmos. Environ.* 44, 2742-2749
- Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe
- Draxler R.R., Rolph G.D., 2010, HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>), NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD
- EMEP Report 4/2011, Transboundary particulate matter in Europe. Status report 2011
- EMEP Status Report 4/2009, Transboundary particulate matter in Europe
- EMEP Status Report 4/2010, Transboundary particulate matter in Europe
- EMEP Status Report 4/2011, Transboundary particulate matter in Europe
- Englert N., 2004, Fine particles and human health – a review of epidemiological studies, *Toxicology Letters* 149, 235–242
- FD12P, 1998, Weather Sensor FD12P. User's Guide, Vaisala

- Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N., 1986, *Atmospheric chemistry: fundamentals and experimental techniques*. Wiley, New York
- Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, 2011, Analiza stanu zanieczyszczenia powietrza pyłem PM10 i PM2,5 z uwzględnieniem składu chemicznego pyłu oraz wpływu źródeł naturalnych. Raport końcowy. Zabrze, kwiecień ([http://www.gios.gov.pl/zalaczniki/artykuly/raport\\_syntetyczny.pdf](http://www.gios.gov.pl/zalaczniki/artykuly/raport_syntetyczny.pdf))
- Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, 2008, Analiza stanu zanieczyszczenia powietrza pyłem PM10 i PM2,5 z uwzględnieniem składu chemicznego pyłu, w tym metali ciężkich i WWA. Warszawa, maj ([http://www.gios.gov.pl/zalaczniki/artykuly/analiza\\_stanu\\_zanieczyszczenia\\_PM10\\_2\\_5.pdf](http://www.gios.gov.pl/zalaczniki/artykuly/analiza_stanu_zanieczyszczenia_PM10_2_5.pdf))
- Gnauk T. i in., 2005, Aerosol characterization at the FEBUKO upwind station Goldlauter (1): Particle mass, main ionic components, OC/EC, and mass closure. *Atmos. Environ.* 39, 4209-4218
- Grosjean D., Seinfeld J.H., 1989: Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols, *Atmos. Environ.* 23, 8, 1733–1747
- Held A. i in., 2008, Aerosol size distributions measured in urban, rural and high-alpine air with an electrical low pressure impactor (ELPI), *Atmospheric Environ.* 42, pp. 8502-8512
- Hinds W.C., 1999, *Aerosol technology. Properties, behavior, and measurement of airborne particles*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. New York
- Hsiao W.L. i in., 2000, Cytotoxicity of PM(2.5) and PM(2.5–10) ambient air pollutants assessed by the MTT and the comet assays, *Mutation Research* 471, 45-55
- Hueglin C. i in., 2005, Chemical characterization of PM2.5, PM10 and coarse particles at urban, near-city and rural sites in Switzerland, *Atmos. Environ.* 39, 637-651
- Johansson C., Norman M., Gidhagen L., 2007, Spatial & temporal variations of PM10 and particle number concentrations in urban air, *Environmental Monitoring and Assessment* 127, 477-487
- Justino C.I.L., Rocha-Santos T.A., Duarte A.C., 2011, Sampling and characterization of nanoaerosols in different environments, *Trends in Analytical Chemistry* 30(3), 554-567
- Kondracki J., 2009, *Geografia regionalna Polski*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa (wyd. 3 uzup.)
- Krahl J. i in., 2005, Fuel design as constructional element with the example of biogenic and fossil diesel fuels, *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal* VII, 1e11. manuscript EE 04 008
- Kulmala M. i in. (w tym Pawłowska H.), 2011, General overview: European Integrated Project on Aerosol Cloud Climate and Air Quality Interactions (EUCAARI) – integrating aerosol research from nano to global scales, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 11, 17941-18160
- Kumar P. i in., 2010, A review of the characteristics of nanoparticles in the urban atmosphere and the prospects for developing regulatory controls, *Atmos. Environ.* 44, 5035-5052
- Laj P. i in., 2009, Measuring atmospheric composition change, *Atmos. Environ.* 43, 5351-5414
- Lin J.J., Lee L.-C., 2003, Characterization of the concentration and distribution of urban submicron (PM1) aerosol particles, *Atmos. Environ.* 38, 469-475
- Makowski K., Wild M., Chmura A., 2008, Diurnal temperature range over Europe between 1950 and 2005, *Atmos. Chem. Phys.* 8, 6483-6498
- Malm W.C. i in., 1994, Spatial and Seasonal Trends in Particle Concentration and Optical Extinction in the United States, *J. Geophys. Res.* 99, 1347-1370
- Manninen H.E. i in., 2009, Charged and total particle formation and growth rates during EUCAARI 2007 campaign in Hyytiälä. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 4077-4089
- Massolo L. i in., 2002, Assessment of mutagenicity and toxicity of different-size fractions of air particulates from La Plata, Argentina, and Lepzig, Germany, *Environmental Toxicology* 17, 219-231
- McMurry P.H., 2000, A review of atmospheric aerosol measurements, *Atmos. Environ.* 34, 1959-1999
- Mejía F.J., 2008, Long-term trends in fine particle number concentrations in the urban atmosphere of Brisbane: the relevance of traffic emissions and new particle formation. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy



- Mirme A. i in., 2007, A wide-range multi-channel Air Ion Spectrometer, *Boreal* 20, *Environmental Research* 12, 247-264
- Molnar A., Meszaros E., Ogren J.A., 1999, On the possible role of carbonaceous particles in the control of optical properties of fine atmospheric aerosol, *J. of Aerosol Science* 30, 1, 859-860
- Monn C., 2001, Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen, dioxide and ozone. *Atmospheric Environment* 35, 1-32
- Morawska L. i in., 1999, The modality of particle size distribution of environmental aerosols, *Atmospheric Environ.* 33, 4401-4411
- Morawska L. i in., 2009, Review Article, Environmental Monitoring of Nanoparticles, *The Royal Society of Chemistry*
- Moreno T. i in., 2006, Variations in atmospheric PM trace metal content in Spanish towns: Illustrating the chemical complexity of the inorganic urban aerosol cocktail, *Atmos. Environ.* 40, 6791-6803
- Müller T. i in., 2011, Design and performance of a three-wavelength LED-based total scatter and backscatter integrating nephelometer, *Atmos. Meas. Tech.* 4, 1291-1303
- Oberdörster G. i in., 1995, Association of particulate air pollution and acute mortality: involvement of ultrafine particles?, *Inhalation Toxicology* 7, 111-124
- Ochiai N. i in., 2007, Characterization of organic compounds in atmospheric nanoparticles by thermal desorption -GCxGC coupled to high-resolution time-of-flight mass spectrometry, 27th Int. Symp. Halogenat.Persistent Org.Pollut.-DIOXIN 2007 (Poster Session), *Organohalogen Compd.* 69
- Pakkanen T.A. i in., 2003, Size distributions of mass and chemical components in street-level and rooftop PM1 particles in Helsinki, *Atmospheric Environ.* 37, 1673-1690
- Pandolfi M. i in., 2011, Variability of aerosol optical properties in the Western Mediterranean Basin, *Atmos. Chem. Phys.* 11, 8189-8203
- Pastuszka J.S., Wawroś A., Talik E., Paw U.K.T., 2003, Optical and chemical characteristics of the atmospheric aerosol in four towns in southern Poland, *The Science of the Total Environment* 309, 237-251
- Perez N. i in., 2008, Partitioning of major and trace components in PM10-PM2.5-PM1 at an urban site in Southern Europe, *Atmos. Environ.* 42, 1677-1691
- Peters A. i in., 1997, Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 155(4), 1376-1383
- Pope C.A., Dockery D.W., 2006, Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect, *Journal of the Air & Waste Management Association* 56, 709-742
- Querol X. i in., 2001, PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain. *Atmos. Environ.* 35, 6407-6419
- Ragosta M. i in., 2006, PM10 and heavy metal measurements in an industrial area of southern Italy. *Atmospheric Research* 81, 304-319
- Richards W.L., 1999, Use of the Deciview Haze Index as an Indicator for Regional Haze, *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 49, 1230-1237
- Rodríguez S. i in., 2008, Influence of sea breeze circulation and road traffic emissions on the relationship between particle number, black carbon, PM1, PM2.5 and PM2.5-10 concentrations in a coastal city, *Atmos. Environ.* 42, 6523-6534
- Rogula-Kozłowska W. i in., A study on the seasonal mass closure of ambient fine and coarse dusts in Zabrze, Poland, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* (in press)
- Rolph, G.D., 2010: Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) Website (<http://ready.arl.noaa.gov>), NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD
- Rosenbohm E. i in., 2005, Particulate Size Distribution and Mass Measured at a Motorway during the BAB II Campaign, *Atmos. Environ.* 39, 5696-5709

- Roth E. i in., 2008, Size distributions of fine and ultrafine particles in the city of Strasbourg: Correlation between number of particles and concentrations of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> gases and some soluble ions concentration determination, *J. of Environmental Management* 86, 282-290
- Ruckstuhl C. i in., 2008, Aerosol and Cloud effects on solar brightening and the recent rapid warming, *Geophys. Res. Lett.* 35
- Saarikoski S., 2008, Chemical mass closure and source-specific composition of atmospheric particles. Academic Dissertation. Finnish Meteorological Institute, Contributions, No. 74. Helsinki
- Schneider J. i in., 2008, In situ measurements of particle number concentration, chemically resolved size distributions, and black carbon content of traffic related emissions on German motorways, rural roads, and in city traffic, *Atmos. Environ.* 42, 4257-4268
- Seinfeld J.H., Pandis S.N., 2006, *Atmospheric Chemistry and Physics, from Air Pollution to Climate Change*, 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley, New York
- Shi J.P. i in., 2001, Sources and concentration of nanoparticles (< 10 nm diameter) in the urban atmosphere, *Atmos. Environ.* 35, 1193-1202
- Simonet B.M., Valcárcel M., 2009, Monitoring nanoparticles in the environment, *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 393, 17-21
- Spindler G. i in., 2010, A four-year size-segregated characterization study of particles PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> depending on air mass origin at Melpitz, *Atmos. Environ.* 44, 164-173
- Tong Y. i in., 2002, Study of the toxicological mechanism of acidified aerosols, *Biological Trace Element Research* 85, 149-156
- TSI, 2005, Model 3563: Integrating Nephelometer. Operation and Service Manual, P/N 1933563, Revision F, December
- Vautard R., Yiou P., Oldenborgh van G.J., 2009, Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years, *Nature Geoscience* 2, 115-119
- Vester B.P. i in., 2007: Composition and mixing state of the urban background aerosol in the Rhein-Main area (Germany). *Atmos. Environ.* 41, 6102-6115
- Wehner B. i in., 2007, The New UFP 330: Comparison with a DMPS for Ambient Aerosols, European Aerosol Conference 2007, Salzburg, Abstract T13A202
- WMO, 1992, International Meteorological Vocabulary. WMO No. 182, Geneva
- WMO/GAW, 2003, Aerosol measurement procedures guidelines and recommendations, No. 153, WMO TD No. 1178, September
- Woo K.S. i in. 2001, Measurement of Atlanta aerosol size distributions: observations of ultrafine particle events, *Aerosol Science and Technology* 34, 75-87
- Yin, J., Harrison, R.M., 2008, Pragmatic mass closure study for PM<sub>1.0</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at roadside, urban background and rural sites. *Atmos. Environ.* 42, 980-988

*Autorzy pracy składają podziękowania NOAA ARL (National Oceanic and Atmospheric Administration Air Resources Laboratory) za udostępnienie modelu HYSPLIT i READY (<http://www.arl.noaa.gov/ready.php>), których wyniki zostały wykorzystane w publikacji.*

*Autorzy pracy pragną serdecznie podziękować Panu Beniaminowi Kwaśnicy za obsługę stacji pomiaru aerozoli oraz pomoc w gromadzeniu i weryfikacji danych*

# **Wpływ zanieczyszczeń powietrza na jakość życia – ocena zagrożeń i możliwości ograniczenia skutków. Propozycja działań adaptacyjnych**

*Leszek Ośródka, Ewa Krajny, Krzysztof Klejnowski,  
Wioletta Rogula-Kozłowska*

## **1. Ocena zagrożeń i możliwości ograniczenia skutków**

Zagadnienie wpływu zanieczyszczeń powietrza na jakość życia jest niezwykle złożone i trudne do jednoznacznej oceny. Jak wykazano w wielu dotychczasowych pracach, dotyczy problemów zarówno o charakterze globalnym: zmiany klimatu wywołane czynnikami antropogenicznymi (emisja gazów szklarniowych, aerozoli), jak i o znaczeniu regionalnym i lokalnym (zmiany warunków solarnych, termicznych i opadowych, zmniejszenie widzialności czy wywoływanie negatywnych skutków zdrowotnych) [Jacob, Winner 2009; Tagaris i in. 2009]. Zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego są zmienne w czasie i przestrzeni, co wynika między innymi z liczby i rodzaju źródeł emisji zanieczyszczeń pyłowych i/lub gazowych zlokalizowanych na danym terenie oraz zależy od okresowych warunków meteorologicznych.

Niewątpliwie najbardziej spektakularne i najdokładniej badane są skutki zanieczyszczenia atmosfery wywoływane przez emisję gazów cieplarnianych. Emisja ta powoduje bowiem skutki o charakterze globalnym – ocieplenie klimatu, wzrost częstości występowania zjawisk ekstremalnych – co pośrednio wpływa na ilościowe i jakościowe zmiany innych komponentów środowiska [Tagaris 2009; Zwoździak i in. 2010]. Nie bez wpływu na klimat są też i inne zanieczyszczenia, szczególnie aerozolowe.

Zarówno sama obecność aerozolu atmosferycznego, jak i fluktuacje czasowo-przestrzenne jego własności mają wpływ na środowisko. Globalne oddziaływanie aerozolu atmosferycznego polega na wpływie na klimat czy widzialność, a lokalne – na ekosystemy i ludzi.

Wpływ aerozolu atmosferycznego na klimat objawia się w dynamice globalnego ocieplenia i zaniku warstwy ozonowej, a także występowaniem kwaśnych deszczy [Kmieć i in. 1995; Rhode i in. 1995; Pueshel 1996; Schwartz 1996; Hinds 1998; Munn, Maarouf 1997]. Na widzialność aerozol atmosferyczny może wpływać w różny sposób zależnie od warunków, przede wszystkim meteorologicznych. Widzialność może być związana ze zmianami stężenia fazy rozproszonej aerozolu [Tsai i in. 2003].

Zanieczyszczenia pyłowe atmosfery modyfikują także lokalne i regionalne warunki przyrodnicze, w tym warunki życia ludzi. W rejonach o dużej koncentracji przemysłowych i komunalnych źródeł emisji, w okresie nasilonej aktywności tych emitorów (np. w sezonie grzewczym) dochodzi do dużej kumulacji zanieczyszczeń powietrza, utrzymującej się przez określony czas, na określonym obszarze. Sprzyjają temu niekorzystne warunki meteorologiczne – długo utrzymujące się układy wysokiego ciśnienia w chłodnej porze roku ze słabym wiatrem, w których formują się inwersje termiczne. Tworzą się wówczas tzw. epizody wysokich stężeń zanieczyszczeń, które zależnie od okoliczności mogą obejmować nawet całą Polskę i trwać kilka dni. Takie sytuacje wystąpiły w Polsce w ostatnich 6 latach kilkakrotnie: w styczniu 2006, styczniu 2010, październiku/listopadzie 2011, lutym 2012.

Przeprowadzone w ramach projektu KLIMAT badania zmierzające do określenia uwarunkowań środowiskowych na stężenia szczególnie niebezpiecznych dla zdrowia drobnych i ultradrobnych cząstek pyłu potwierdziły, że obok warunków meteorologicznych o jakości powietrza decydują, w przeciwieństwie do innych krajów Unii Europejskiej, źródła komunalne w wyniku spalania złych jakościowo paliw. Świadczy o tym między innymi analiza składu granulometrycznego pyłu, w którym dominują nadal cząstki większej frakcji. Poprawa tego stanu rzeczy wymaga dalszych intensywnych przedsięwzięć zmierzających do zmiany sposobu ogrzewania w sektorze komunalnym w szczególności w zagrożonych obszarach.

Dostępne dane z zakresu epidemiologii środowiskowej sugerują z kolei istnienie związku przyczynowo-skutkowego między narażeniem na zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego a występowaniem dodatkowych zachorowań, a nawet zgonów z powodu chorób układu oddechowego. Jest to szczególnie widoczne w okresie dużego nasilenia zanieczyszczeń (np. w okresie smogu zimowego spowodowanego zanieczyszczeniami pyłowymi czy letniego powstającego w wyniku kumulacji ozonu troposferycznego). W toku licznych badań udowodniono, iż częstość występowania ostrych incydentów ze strony układu oddechowego lub zaostrzenia przewlekłych chorób płuc, a nawet zgonów ma związek ze wzrostem stężeń zanieczyszczeń. Istnieją także dowody wskazujące na to, że zła jakość powietrza atmosferycznego może prowadzić do upośledzenia sprawności wentylacyjnej płuc, szczególnie w populacji dzieci. Udokumentowano ponadto niekorzystny wpływ zanieczyszczeń powietrza na umieralność specyficzną, a także zachorowalność z powodu chorób układu krążenia, takich jak zawał mięśnia sercowego czy udar mózgu [Zanobetti i in. 2003].

Wśród najczęściej opisywanych w kontekście potencjalnych skutków zdrowotnych znajdują się następujące zanieczyszczenia powietrza charakterystyczne

dla okresu zimowego: pył zawieszony, głównie frakcja PM<sub>2,5</sub> oraz tzw. ultracząstki, zanieczyszczenia gazowe dwutlenkiem siarki (SO<sub>2</sub>) i tlenkami azotu (NO<sub>x</sub>). Wymienione substancje są jednocześnie głównymi zanieczyszczeniami powietrza, których stężenie wzrasta wyraźnie w okresie incydentów smogu zimowego. Wśród innych zanieczyszczeń o postulowanym wpływie na stan układu oddechowego wyróżnia się tzw. kwaśne aerozole, powstające głównie w następstwie przemian chemicznych dwutlenku siarki [Pope, Dockery 2006].

W okresie letnim istotnym zagrożeniem zdrowotnym są podwyższone stężenia ozonu troposferycznego, a także alergenów w powietrzu. W obydwu przypadkach stężenia te są silnie zależne od warunków meteorologicznych, a istniejące dowody z zakresu epidemiologii środowiskowej potwierdzają ich niekorzystny wpływ na stan zdrowia narażonej populacji [Kowalska i in. 2008, Zwoździak i in. 2010].

Prowadzone w krajach europejskich, w tym również w Polsce, programy lub polityki zdrowotne z zakresu zdrowia środowiskowego (takie jak CITEAIR czy E-HIA) są oparte na monitoringu jakości powietrza atmosferycznego, ocenie wpływu mierzonych stężeń zanieczyszczeń i warunków meteorologicznych na stan zdrowia populacji, a także na komunikowaniu środowiskowego ryzyka zdrowotnego. Tylko takie scenariusze są akceptowane społecznie i dzięki włączeniu do procesu podejmowania decyzji populacji zamieszkałej zarówno w mieście, jak i na wsi mogą w efekcie prowadzić do redukcji zagrożenia.

Zakładając wpływ aerozolu z jednej strony na wymuszenie radiacyjne powodujące zmianę bilansu cieplnego Ziemi i mierzalne skutki klimatyczne, a skutki zdrowotne z drugiej, zaproponowano wykorzystanie istniejących metod obserwacji wybranych elementów meteorologicznych (uniwersalny czujnik pogody, ceilometer) do bieżącej oceny tła zanieczyszczenia pyłem (głównie frakcji PM<sub>2,5</sub>) i oceny zawartości aerozolu w warstwie granicznej atmosfery.

Obserwacje właściwości optycznych atmosfery pod kątem badań aerozoli atmosferycznych różnego pochodzenia mogłyby być prowadzone w sposób ciągły z wykorzystaniem przeznaczonych do obserwacji zachmurzenia ceilometrów, które są zlokalizowane na stacjach IMGW-PIB. Według stanu na IX 2011 r. w Polsce funkcjonuje 20 takich przyrządów. Jednakże w ramach zadań narodowej służby meteorologicznej nie jest operacyjnie archiwizowany sygnał rozproszenia wstecznego. Monitoring ten uzupełniony o sieć kamer internetowych wspomagających ocenę widzialności i rozszerzenie prognoz o modelowanie parametrów optycznych atmosfery i stężenie aerozoli, które wpływają między innymi na bezpieczeństwo drogowe, a przez percepcję wzrokową na samopoczucie, a więc i na jakość życia.

Badania wykazały, że przydatność nefelometrów integrujących do szybkiej oceny parametrów optycznych atmosfery i identyfikacji antropogenicznych źródeł PM. Należy rozważyć celowość stosowania tego typu urządzeń do wczesnego wykrywania pożarów w obszarach leśnych czy ograniczenia widzialności powodowanej smogiem w newralgicznych węzłach komunikacyjnych, a także w procedurach alarmowych związanych z sytuacjami smogowymi w obszarach miejskich.

Doświadczenia z eksploatacji liczników ziaren wskazują na celowość rozpo-

ry, jako dodatkowego parametru umożliwiającego lepszą ocenę narażenia populacji na szkodliwe oddziaływanie PM.

Analizy składu chemicznego pyłów wykazały istotną rolę związków węgla emitowanych do atmosfery z procesów spalania. Porównując poziomy stężenie OC/EC w kraju z sytuacją na świecie, należy stwierdzić, że spalanie paliw kopalnych wywiera istotny wpływ na skład chemiczny i własności aerozoli atmosferycznych. Wysoka koncentracja PM i duża zawartość OC/EC mogą skutkować większym niż w rejonach „czystych” ujemnym efektem w bilansie radiacyjnym.

Potwierdzone badaniami w wysokie koncentracje sadzy, wskazują na występowanie w obszarze badań substancji o negatywnym wpływie na zdrowie, uznawanej za jeden z ważniejszych po CO<sub>2</sub> czynników generujących efekty cieplarniane. Cząstki sadzy (BC) z uwagi na hydrofobowość potrafią przemieszczać się na duże odległości i zdeponowane w obszarach arktycznych wpływają na przyspieszenie topienia lodowców. Stosowanie w gospodarstwach domowych węgla i biomasy powoduje, że jesteśmy znaczącym źródłem emisji BC w skali UE. Emisji BC w procesach spalania, a w szczególności w silnikach samochodowych, towarzyszy emisja cząstek UFP.

Duże liczebności cząstek UFP w obszarach miejskich w sezonie letnim mogą sprzyjać zwiększeniu intensywności procesów kondensacji, co może intensyfikować i zwiększać ryzyko ekstremalnych zjawisk pogodowych. Ponieważ głównym źródłem emisji w miastach w sezonie letnim jest komunikacja, należy zwiększyć presję na ograniczenie emisji pyłów z tych źródeł. W szczególności przez modernizację pojazdów i maszyn roboczych z napędem dieslowskim, polegającą na stosowaniu skutecznych filtrów pyłowych.

Energetyka oparta o węgiel skutkuje generowaniem wtórnych zanieczyszczeń pyłowych. Badania wykazują konieczność dalszej znaczącej redukcji emisji gazowych prekursorów cząstek stałych emitowanych w procesach spalania. Bez znaczącego ograniczenia emisji związków siarki azotu i węgla nie będzie możliwe osiągnięcie docelowych standardów jakości powietrza dla PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub>.

Obecność związków węgla i pierwiastków alkalicznych w PM<sub>1</sub>, wskazuje na negatywne efekty spalania biomasy w istniejących instalacjach. Rozwój energetyki opartej na biomase należy ukierunkować na spalanie jej lub gazyfikację w instalacjach przystosowanych do skutecznego eliminowania emisji pyłów do atmosfery. W innym przypadku wzrost zużycia biomasy w gospodarce mimo pozytywnego efektu w zakresie bilansowania emisji dwutlenku węgla, spowoduje negatywne skutki w zakresie emisji drobnych cząstek pyłu i zawartych w nich substancji o wysokiej ekotoksyczności. Rozwój i rozpowszechnianie technologii energetycznych bazujących na współspalaniu biomasy wymaga większego zainteresowania się składem chemicznych emitowanych pyłów.

## **2. Propozycje działań adaptacyjnych**

Niska jakość powietrza, w szczególności w zakresie zanieczyszczeń pyłowych, wymaga podjęcia działań korekcyjnych i adaptacyjnych w całej gospodarce.

Konsekwencje bezpośrednio i pośrednio występowania wysokich stężeń pyłu przekładają się na wymierne straty gospodarcze oraz mają niewątpliwie znaczące społeczne skutki, objawiające się relatywnym skróceniem długości życia populacji i zwiększeniem kosztów opieki zdrowotnej.

Analiza realizowanych do tej pory w kraju strategii poprawy jakości powietrza, wskazuje na małą skuteczność działań na szczeblu lokalnym.

Jedynym racjonalnym sposobem ograniczenia skutków chwilowych i długoterminowych złej jakości powietrza w obszarze całego kraju jest zatem podjęcie kompleksowych działań w obszarze gospodarki, planowania przestrzennego, edukacji i ochronie zdrowia.

#### *Gospodarka energetyczna*

Analiza stanu zanieczyszczenia powietrza wykazała, że sposób zaspokajania potrzeb energetycznych, w tym struktura zużycia paliw, bezpośrednio wiąże się z zanieczyszczeniem powietrza pyłem zarówno w zakresie emisji pierwotnej, jak i wtórnych produktów przemian zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery w procesach spalania.

Osiągnięcie trwałych efektów w zakresie redukcji stężeń aerozoli i związanych z nimi negatywnych efektów klimatycznych wymaga zmian w strukturze użytkowania energii. Niezbędne jest wyeliminowanie niskosprawnych i wysokoemisyjnych palenisk i kotłów w obrębie zabudowy miejskiej.

Paliwa kopalne (węgiel) muszą w znacznym stopniu zostać wyeliminowane z sektora gospodarki komunalnej na rzecz gazu ziemnego i energii elektrycznej. Jedynie wysokosprawne instalacje spalające paliwa kopalne mogą w sposób skuteczny wyeliminować emisje pyłów w obszarach miejskich i znacząco zmniejszyć emisję składników kwaśnych.

Stwierdzone wysokie koncentracje OC/EC to kolejna grupa zanieczyszczeń o negatywnym wpływie na bilans radiacyjny i zdrowie, których wyeliminowanie wymaga stosowania wysokosprawnych układów spalania. Także energetyczne wykorzystanie biomasy wymaga stosowania odpowiednio wysoko zawansowanych technologicznie instalacji energetycznych. Badania wykazują znaczący udział w emisji węgla z tego typu paliw w obszarach wiejskich oraz w rejonach rozproszonej zabudowy podmiejskiej. Problem stosowania biomasy to nie tylko kwestie bilansowania emisji dwutlenku węgla, lecz także znaczący problem emisji pyłów oraz znaczna emisja OC i EC.

Z uwagi na potencjał energetyczny, należy rozważyć celowość wprowadzenia mechanizmów umożliwiających zwiększone wykorzystanie energii elektrycznej w celach grzewczych (w tym energii pozyskiwanej z alternatywnych źródeł) w obszarach miejskich, gdzie nie istnieje możliwość lub nie jest ekonomicznie uzasadniony rozwój sieci ciepłowniczych.

Analizując koncepcje wykorzystania alternatywnych źródeł energii, w szczególności należy rozważyć szersze wykorzystanie pomp ciepła w obszarach rozproszonej zabudowy i terenach dolin górskich, gdzie klasyczne metody opalania budynków są źródłem ponadnormatywnych zanieczyszczeń powietrza.

### *Planowanie przestrzenne i ochrona środowiska*

Jednym z istotnych czynników pozwalających na ograniczenie uciążliwości oraz przyczyniających się do eliminacji źródeł emisji na etapie planowania inwestycji są właściwie opracowane i konsekwentnie wdrażane plany zagospodarowania przestrzennego, które na etapie ich opracowania uwzględniają skutki emisji i mikroklimatyczne uwarunkowania jej dyspersji.

Poprawa jakości powietrza, ograniczenie negatywnych konsekwencji klimatycznych związanych z rozwojem przestrzennym wymaga podejmowania już na etapie planowania zagospodarowania wprowadzania rygorystycznych rozwiązań w zakresie sposobów ogrzewania budynków, jak i efektywności energetycznej stosowanych rozwiązań architektoniczno-budowlanych.

W programach ochrony powietrza należy zwiększyć nacisk na systemowe rozwiązania eliminujące emisje substancji do atmosfery z niskosprawnych urządzeń do spalania paliw kopalnych.

W obszarach gdzie dominuje stara zabudowa o niekorzystnej strukturze energetycznej, konieczne jest wprowadzenie kompleksowych programów rewitalizacyjnych ukierunkowanych na poprawę izolacyjności budynków i zmianę systemów grzewczych na niskoemisyjne i likwidację kuchni węglowych do przygotowania posiłków. Należy preferować rozwiązania polegające na podłączeniu do sieci ciepłowniczej, budowę lokalnych kotłowni gazowych, a w obszarach, gdzie nie jest możliwe podłączenie sieci gazowej, wykorzystanie energii elektrycznej.

W obszarach zwartej zabudowy miejskiej niezbędne jest całkowite wyeliminowanie spalania węgla w gospodarstwach domowych, w szczególności w budynkach wielorodzinnych zarówno do celów grzewczych, jak i kuchennych.

Jak wynika z pomiarów i modelowania to obszary zabudowy wielorodzinnej z przewagą opalania węglowego stanowią hot spoty emisyjne we wszystkich strefach w kraju. Ich eliminacja jest możliwa jedynie na drodze kompleksowych programów rewitalizacji starej zabudowy mieszkaniowej. Realizacja pojedynczych inwestycji nie spowoduje znaczącej poprawy – o czym świadczy niski efekt w zakresie poprawy jakości realizowanych programów ograniczenia niskiej emisji.

### *Monitoring*

Doświadczenia projektu wskazują także na celowość stworzenia infrastruktury do ciągłego monitorowania składu fizykochemicznego atmosfery. Jednym z możliwych wariantów takich działań jest stworzenie w południowej części kraju stałej stacji badań składu fizykochemicznego atmosfery bazującej na zakresie badań prowadzonych w ramach GAW/WMO, z wykorzystaniem aparatury pozyskanej w ramach projektu, wyposażonej w sprzęt do badań pionowego profilu aerozoli i oraz spektrometry do badań składu chemicznego. Stacja winna spełniać rolę krajowego centrum analiz składu chemicznego mas powietrza przemieszczających się transgranicznie, modelowania i bilansowania ładunków przenoszonych na tej drodze. Jej działanie powinno wspomagać monitorowanie składników fizykochemicznych atmosfery, wpływających na zmiany klimatu oraz czynników ekotoksycznych powodowanych procesami wielkoskalowymi zachodzącymi w atmosferze.



### *Edukacja i ochrona zdrowia*

Uzyskane w projekcie wyniki badań składu chemicznego i liczebności cząstek ultradrobnych i drobnych winny być wykorzystane dla potrzeb szerokiego programu edukacji ekologicznej i prozdrowotnej. Wykazane znaczące zagrożenie populacji w obszarach miejskich i pozamiejskich frakcjami respirabilnymi PM, wskazuje, że na terenie całego kraju występują strefy o wysokim ryzyku. Dotyczy to zarówno okresu zimowego, jak i letniego, kiedy to obserwuje się dużą liczebność cząstek ultradrobnych i drobnych, których oddziaływanie nie jest do końca zbadane.

Powszechność narażenia wskazuje na konieczność działań edukacyjnych i informacyjnych. Z tego powodu prognoza jakości powietrza, w tym indeksu narażenia, powinna być informacją powszechnie dostępną przez media publiczne i elektroniczne, tak jak jest w wielu krajach.

Upowszechnieniu informacji o potencjalnym ryzyku zdrowotnym winno towarzyszyć propagowanie wiedzy o zagrożeniach dla zdrowia i środowiska, jakie niesie za sobą prognozowany stan. Wdrażanie prognozy pogody chemicznej, która w ostatnich latach jest szczególnie intensywnie rozpowszechniana w krajach Europy Zachodniej i Ameryki Północnej powinno się stać nie tylko częścią każdej procedury działań krótkoterminowych, ale także elementem upowszechniania wiedzy ekologicznej w ogóle. Prognoza taka niekoniecznie musi być realizowana przy wykorzystaniu skomplikowanych obliczeniowo modeli fizycznych lub matematycznych modeli symulacyjnych, lecz nowoczesnych modeli empirycznych.

Z analiz wykonanych w projekcie wynika, że w dużej mierze odpowiedzialność za zły stan jakości powietrza w zakresie emisji pyłowej i gazowej (w tym emisję gazów cieplarnianych) związanej ze spalaniem odpowiadają sami zagrożeni. Konieczna jest szeroka edukacja, pokazująca nie tylko skutki negatywne, ale promująca rozwiązania podnoszące efektywność energetyczną w warunkach gospodarstw domowych.

Wskazane jest podejmowanie kampanii społecznych, które pozwolą na stworzenie negatywnego odbioru działań przyczyniających się do pogarszania jakości powietrza i wyrobienia aktywnej proekologicznej i proklimatycznej postawy młodych pokoleń.

### **Literatura**

- Hinds W.C., 1999, *Aerosol technology. Properties, behaviour, and measurement of airborne particles.* 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley & Sons, Inc. New York
- Jacob D.J., A. Winne D.A., 2009, Effect of climate change on air quality, *Atmospheric Environment* 43, 51-63
- Kmieć G., Kacperczyk K., Zwoździak A., Zwoździak J., 1995, Acid pollutants In the air and precipitation/deposition et the Sudeten Mountains, Poland. *Acid Reign '95? – Conference summary statement.* *Water Air Soil Pollution* 85, 2131-136
- Kowalska M., Zejda J.E., Skrzypek M., Ośródka L., Klejnowski K., Krajny E., Wojtylak M., Hubicki L., 2008, Air pollution and daily mortality in the Urban Area of Katowice, comparison between two periods 1994/95 and 2001/02. *Polish Journal of Environmental Studies*, 17(5):733-738
- Munn R.E., Maarouf A.R., 1997, Atmospheric issues in Canada. *The Science of the Total Environment* 203, 1–11

- Pope III C. A., Dockery D.W., 2006, Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association* 56:709-742
- Pueshel R.F., 1996, Stratospheric Aerosols: Formation, properties, effect, *Journal of Aerosol Science* 27, 359-382
- Rhode H. i in., 1995, Acid Reign '95? – conference summary statement. *Water Air Soil Pollution* 85, 1-14
- Schwartz S.E., 1996, The Whitehouse effect – shortwave radiative forcing of climate by the anthropogenic aerosols: an overview. *Journal of Aerosol Science* 27, 359-382
- Tagaris E. i in., 2009, Potential Impact of Climate Change on Air Pollution-Related Human Health Effects *Environ. Sci. Technol.*, 43 (13), 4979-4988
- Tsai Y.I., Lin Y.H., Lee S.Z., 2003, Visibility variation with air qualities in the metropolitan area in southern Taiwan. *Water, Air and Soil Pollution* 144, 19-40
- Zanobetti A. i in., 2003, The temporal pattern of respiratory and heart disease mortality in response to air pollution. *Environmental Health Perspectives* 111(9), 1188-1193
- Zwoździak A. i in., 2010, Analiza zanieczyszczenia powietrza pyłem  $PM_{2,5}$  w aspekcie potencjalnego ryzyka utraty zdrowotności mieszkańców Wrocławia. *Medycyna Środowiskowa* 2010,13(2):25-31

## **Podsumowanie**

*Michał Ziemiański, Leszek Ośródka*

W świecie ewoluującego klimatu należy oczekiwać istotnych zmian w częstotliwości występowania i intensywności zjawisk pogody, definiowanej jako stan środowiska atmosferycznego o charakterystycznych skalach czasowych (okresach) rzędu godzin i dni. Dotyczy to pogody rozumianej meteorologicznie oraz chemicznie, a także ich wzajemnych zależności i powiązań. Z punktu widzenia potrzeb społecznych i ekonomicznych, szczególną rolę odgrywa potrzeba monitorowania oraz prognozowania zjawisk pogody, a przede wszystkim jej ekstremalnych i istotnych społecznie aspektów, ze względu na potencjalne zagrożenia dla życia i zdrowia ludzi, a także na ich wpływ na infrastrukturę i coraz większą zależność rozmaitych działów gospodarki od stanu pogody.

Niniejszy tom przedstawia wybrane wyniki prac prowadzonych w IMGW-PIB w ramach realizacji projektu KLIMAT, których celem było podjęcie tego wyzwania. Prowadzone prace skupiły się zatem przede wszystkim na rozwoju narzędzi pozwalających na lepsze, dokładniejsze i efektywniejsze monitorowanie oraz prognozowanie stanu środowiska atmosferycznego. W dziedzinie pogody atmosferycznej prace te skupiły się na rozwoju teledetekcyjnych metod śledzenia stanu atmosfery z wykorzystaniem metod naziemnych, głównie teledetekcji radarowej, oraz satelitarnych. Prace te dotyczyły także rozwoju narzędzi związanych z numerycznym modelowaniem pogody, w tym implementacji metod asymilacji danych obserwacyjnych do modelu pogody, implementacji numerycznego modelu pogody o rozdzielczości poziomej 2,7 km, pozwalającej na odwzorowanie intensywnych procesów konwekcyjnych na obliczeniowej siatce modelu, a także rozwoju nowoczesnych metod weryfikacji wyników modeli pogody, opartych na metodach rozmytych. Przedstawione w niniejszym tomie artykuły dokumentują uzyskane wyniki i osiągnięcie istotnych planowanych celów projektu. Należy też podkreślić, że przedstawione w niniejszej monografii wyniki nie wyczerpują wszystkich osiągniętych rezultatów, z których istotna część zostanie przedstawiona w wyspecjalizowanych periodykach naukowych.

W dziedzinie pogody chemicznej, ze względu na złożoną specyfikę problemu, wyniki projektu przedstawiono nieco inaczej. Zagadnieniom metodycznym poświęcono pierwszą część tego rozdziału przedstawiając na tle diagnozy aktualnych

problemów zanieczyszczeń powietrza – głównie pyłowych – propozycję wdrożenia szybkiej prognozy pogody chemicznej opartej na wykorzystaniu numerycznej prognozy pogody i metody eksploracji danych. Druga część rozdziału dotyczyła implementacji nowoczesnej aparatury pomiarowej do oceny stanu zanieczyszczenia pyłem, zwłaszcza drobnej frakcji, i badania możliwości wnioskowania o przyczynach powstawania i skutkach oddziaływania tych zanieczyszczeń. Oba te zagadnienia rozpatrywano mając na względzie zarówno aspekty praktyczne – konieczność wdrożenia zapisów Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy nakładającej szczególne obowiązki na kraje członkowskie w zakresie szybkiej poprawy istniejącego stanu rzeczy, jak i badawcze – implikacje wynikające z wpływu tych zanieczyszczeń na system klimatyczny Ziemi.

Istotną częścią wyników uzyskanych w ramach realizacji projektu KLIMAT są także propozycje możliwości ograniczenia skutków niekorzystnych zmian klimatu przez odpowiednie działania wyprzedzające i adaptacyjne. W sferze problemów związanych ze skutkami ekstremalnej pogody meteorologicznej, gdzie szczególnej wagi nabierają problemy związane z silnymi opadami, obszernie analizy w tej dziedzinie zostały przedstawione w tomach monografii związanych z prognozowaniem zmian klimatu oraz związanymi z nimi problemami hydrologicznymi i gospodarki wodnej. Z kolei niniejszy tom szeroko omawia zagadnienia związane z oceną zagrożeń związanych z wpływem zanieczyszczeń powietrza na jakość życia oraz przedstawia propozycje działań adaptacyjnych i ograniczających w tej dziedzinie. Propozycje te dotyczą szeregu poziomów i obszarów działań poczynając od gospodarki energetycznej, poprzez planowanie przestrzenne po edukację i ochronę zdrowia (por. rozdział *Wpływ zanieczyszczenia powietrza na jakość życia...*).

Autorzy	Afiliacja
<i>Zdzisław Dziewit Wojciech Gajda Anna Jurczyk Rafał Lewandowski Katarzyna Ośródka Paweł Rychlewski Jan Szturc Irena Tuszyńska</i>	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy Ośrodek Teledetekcji Naziemnej
<i>Rafał Iwański Bożena Łapeta Monika Pajek Danuta Serafin-Rek Piotr Struzik</i>	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy Ośrodek Teledetekcji Satelitarnej
<i>Andrzej Mazur Witold Interewicz Joanna Linkowska Marek Łazanowicz Grzegorz Duniec</i>	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy Dział Numerycznych Prognoz Meteorologicznych COSMO
<i>Piotr Drzewiecki</i>	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy Oddział w Krakowie, Dział Służby Obserwacyjno-Pomiarowej
<i>Bogdan Bochenek Marek Jerczyński Marcin Kolonko Małgorzata Szczęch-Gajewska Jadwiga Woyciechowska</i>	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy Oddział w Krakowie, Dział Numerycznych Prognoz Meteorologicznych
<i>Barbara Błaszczak Jadwiga Błaszczyk Krzysztof Klejnowski Andrzej Krasa Patrycja Rogula-Kopiec Wioletta Rogula-Kozłowska</i>	Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN w Zabrze, Zakład Ochrony Powietrza
<i>Ewa Krajny Leszek Ośródka Marek Wojtylak</i>	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy Oddział w Krakowie, Zakład Monitoringu i Modelowania Zanieczyszczeń Powietrza
<i>Barbara Toczko</i>	Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Departament Monitoringu i Informacji o Środowisku