

Wkład prezentowany na Akademickim Forum: *Między Bali a Poznaniem. Polska wobec zmian Klimatu: Nauka – Gospodarka – Polityka – Społeczeństwo* prowadzonym przez - Uniwersytet Warszawski- Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Wszechnicę Polską – Szkołę Wyższą Towarzystwa Wiedzy Powszechnej, Katedrę Turystyki i Ekonomii.

Dr Konrad Bajer
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego

Polskie badania geofizyczne wyjaśniające zmiany klimatu

Alarm, jaki przed kilkoma dekadami podniosła część mieszkańców naszej planety bardziej niż inni przejmujących się jej przyszłością spowodował skutki znacznie trwalsze i bardziej znaczące niż można się było spodziewać. Naukowe doniesienia o ubytku ozonu nad Antarktydą, emocjonująco nazwanym dziurą ozonową, pobudziły wyobraźnię i zostały potraktowane poważniej niż różne wcześniejsze ostrzeżenia uczonych. Pomimo nieustających kontrowersji w ocenach stopnia zagrożenia i optymalnej strategii jaką warto przyjąć.

Ranga jaką problemy zmian klimatu zyskały w świadomości społecznej, a którą uznaje dziś nawet znacząca część elit politycznych, cieszy tym bardziej, że w przeszłości odmawiano jej nawet zagrożeniom nieporównanie bardziej ewidentnym takim jak broń masowej zagłady, czy skażenie środowiska naturalnego. Wyjątkiem było w przeszłości i zapewne w dużym stopniu nadal pozostaje pokojowe wykorzystanie energii jądrowej, np. w elektrowniach, gdzie relacja jest odwrócona i zagrożenie jest w świadomości społecznej wyolbrzymione w stosunku do tego, co mówią naukowe fakty. Analiza różnicy w społecznym odbiorze pomiędzy, na przykład, zagrożeniem jakim jest zmiana klimatu, a zagrożeniem jakie stwarzają elektrownie jądrowe należy, przede wszystkim, do psychologii społecznej, ale naukowcom, którzy z niechęcią odnoszą się do nuklearnej fobii warto przypomnieć, że przynajmniej częściowo wynika ona z tego, że w przeszłości udało im się skutecznie zasiać przerażenie, na którego skutki teraz narzekają. Nowe lub niedawno uświadomione zagrożenia lepiej jednak wyolbrzymiać niż ich niedoceniać.

Naukowa wiedza i społeczna percepcja zmian klimatu są chyba teraz właśnie w fazie obaw przed czymś, co słabo poznane, a groźne w stopniu trudnym, na razie, do przewidzenia. Obawy te, pomimo wielu wysiłków, nie są jeszcze i pewnie nie staną się panicznym lękiem, bo zmiana klimatu jest, na skali ludzkiego życia, procesem bardzo powolnym, a więc nie katastrofalnym i dlatego przypuszczamy, że zdążymy się do niej przystosować. Wprawdzie powszechne jest przekonanie o ludzkiej zdolności do popełniania zbiorowych głupstw, ale równie silna jest wiara w umiejętność stawiania czoła ich konsekwencjom, choćby z opóźnieniem. Innymi słowy, człowiek choć po szkodzi, ale jednak mądry.

Przekonanie o naszych zdolnościach przystosowawczych działa uspokajająco. Gdyby ktoś

Impreza zorganizowana w ramach obchodów Dnia Ziemi 2008 przez Fundację Ośrodka Edukacji Ekologicznej. Na organizację Forum wsparcie zostało udzielone przez Islandię, Lichtenstein i Norwegię poprzez dofinansowanie ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego oraz budżetu Rzeczypospolitej Polskiej w ramach Funduszu dla Organizacji Pozarządowych.

Wkład prezentowany na Akademickim Forum: *Między Bali a Poznaniem. Polska wobec zmian Klimatu: Nauka – Gospodarka – Polityka – Społeczeństwo* prowadzonym przez - Uniwersytet Warszawski- Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Wszechnicę Polską – Szkołę Wyższą Towarzystwa Wiedzy Powszechnej, Katedrę Turystyki i Ekonomii.

mógł nas zapewnić, że procesy klimatyczne są od nas niezależne, a jedyne co nam pozostaje to wypracowanie strategii przystosowawczej, to sprawa pozostałaby zapewne domeną codziennej polityki z tą różnicą, że globalny charakter zagrożenia zmuszałby do globalnej współpracy. Emocjonalne zaangażowanie i moralne spory dotyczyłyby wtedy kwestii na ile bogate kraje powinny pomagać reszcie świata, bo pojawiałyby się zapewne wyznawcy idei ratowania jedynie własnej skóry wbrew oczywistości wspólnego globalnego a nawet międzygatunkowego interesu.

Ewolucja ziemskiego klimatu traktowana jest jednak poważniej i bardziej skupia uwagę niż wiele innych globalnych i regionalnych problemów. Aktywiści pobudzania ekologicznych sumień i orędownicy troski o przyszłe pokolenia uważają, że to wciąż zbyt mało, chętnie ignorując dysproporcję pomiędzy uwagą poświęcaną, na przykład, przeciwdziałaniu ewentualnemu ocieplaniu klimatu potencjalnie potęgującemu problem głodu, a uwagą poświęcaną doraźnemu zwalczaniu głodu na świecie.

Przyczyną tej szczególnej uwagi poświęcanej zmianom klimatu jest zapewne to, że ewentualne ich skutki są trudne do przewidzenia i nasza wyobraźnia ma spore pole do popisu w wymyślaniu najczarniejszych scenariuszy, a argument, że należy się przygotowywać na najgorsze zwycięża z bardziej racjonalnym szacowaniem ryzyka i odsuwaniem na dalszy plan scenariuszy dramatycznych lecz mało prawdopodobnych. Powracający falami niepokój nadający problemom zmian klimatu aktualność wynika ze zmieniających się ocen i opinii na temat roli człowieka w tych procesach i jego możliwości wpływania na ich bieg.

W badaniach naukowych nad zmianami klimatu dają się wyróżnić cztery główne obszary choć, jak zwykle w nauce, nowe idee i cenne wyniki pojawiają się na styku dyscyplin, właśnie tam gdzie tradycyjna klasyfikacja zawodzi. Objawy, mechanizmy i konsekwencje zmian klimatu są odkrywane i dokumentowane przez badaczy bardzo różnych specjalności, a zatem literatura przedmiotu jest nie tylko ogromna, ale również rozrzucona po czasopiśmie naukowych odległych dyscyplin, a więc nie sposób całą szczegółowo śledzić. Cytowane niżej publikacje, to wybór prac naukowych, w które zaangażowani są lub byli w ostatniej dekadzie polscy naukowcy. Jest to jedynie niewielka część prowadzonych w Polsce prac naukowych mających związek z problemem zmian klimatu. Subiektywnie wybrałem te, które uznałem za najbardziej reprezentatywne i w których implikacje klimatologiczne są wyraźnie zaznaczone.

Pierwszym nurtem badań jest zbieranie ewidencji zmian klimatu jakie miały miejsce w dalszej przeszłości. Jest to domena paleoklimatologii. Znajomość warunków jakie panowały na Ziemi w odległych epokach pozwala się domyślać, co może nam grozić w przyszłości. Chcemy wiedzieć jak szybko i w jakim zakresie klimat zmieniał się w epokach kiedy gatunek ludzki nie istniał oraz wtedy, kiedy byliśmy biernymi uczestnikami tych procesów mając w nich znikomy udział. Badania paleoklimatyczne, prócz typowej akademickiej roli zaspokajania ciekawości mogą nam wskazać skalę zadań jakie musimy podjąć, aby przygotować się na nadchodzące Impreza zorganizowana w ramach obchodów Dnia Ziemi 2008 przez Fundację Ośrodka Edukacji Ekologicznej. Na organizację Forum wsparcie zostało udzielone przez Islandię, Lichtenstein i Norwegię poprzez dofinansowanie ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego oraz budżetu Rzeczypospolitej Polskiej w ramach Funduszu dla Organizacji Pozarządowych.

Wkład prezentowany na Akademickim Forum: *Między Bali a Poznaniem. Polska wobec zmian Klimatu: Nauka – Gospodarka – Polityka – Społeczeństwo* prowadzonym przez - Uniwersytet Warszawski- Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Wszechnicę Polską – Szkołę Wyższą Towarzystwa Wiedzy Powszechnej, Katedrę Turystyki i Ekonomii.

zmiany klimatyczne, jak i, do pewnego stopnia, skalę czasu o jakiej trzeba w tym kontekście myśleć.

Badania paleoklimatyczne są nadzwyczaj interdyscyplinarne. Wbrew pozorom nie muszą bezpośrednio dotyczyć odległej przeszłości. Stwierdzenie, że skład izotopowy deszczów monsunowych niewiele zmienia się z upływem lat jest badaniem procesów teraźniejszych, ale takie stwierdzenie daje metodę badania dynamiki monsunów w przeszłości poprzez analizę składu izotopowego osadów, na przykład na Wyżynie Tybetańskiej [1]. W pracach tych uczestniczy Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Inny problem paleoklimatyczny z zamierzchłej choć geologicznie bardzo nam bliskiej przeszłości, to obieg izotopu węgla ^{14}C . Zmiany jego stężenia w atmosferze wynikają ze zmiennego tempa produkcji i zmiennego tempa wymiany węgla między atmosferą i powierzchnią Ziemi, a w szczególności między atmosferą i oceanem. O produkcji decyduje docierające do Ziemi promieniowanie kosmiczne zależne od aktywności Słońca i od pola magnetycznego Ziemi, które to czynniki potrafimy w pewnym zakresie modelować. Stwierdzany w osadach wzrost stężenia ^{14}C , któremu nie odpowiada wzrost produkcji tego izotopu, przypisuje się spowolnieniu tempa „odbierania” go przez ocean, na przykład, spowolnieniu opadania wód powierzchniowych na północnym Atlantyku, co jak przypuszczamy miało miejsce pod koniec ostatniego zlodowacenia [2,3]. Spowolnienie cyrkulacji głębinowych wód oceanicznych może być jednym ze skutków globalnego ocieplenia klimatu w przyszłości i dlatego chcemy wiedzieć czy, kiedy i w jakim stopniu miało to miejsce w przeszłości. Jedną z hipotez, jak wiadomo, mówi, że globalne ocieplenie może osłabić Prąd Zatokowy wskutek czego, paradoksalnie, w Europie będzie chłodniej. W badaniach tych zagadnień biorą udział naukowcy z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Śląskiego i z Państwowego Instytutu Geologicznego.

Drugi nurt badań klimatycznych skupia się na poznawaniu zmian klimatu w naszych czasach, a więc w tym stosunkowo krótkim okresie, dla którego dysponujemy danymi pomiarowymi lub przekazami historycznymi pozwalającymi wnioskować o klimacie. W drugiej połowie piętnastego stulecia w różnych ośrodkach europejskich pojawiły się systematyczne notatki opisujące pogodę. Astronom Johannes Müller założył w Norymberdze drukarnię i w roku 1474 drukował w niej kalendarz astronomiczny na lata 1475-1506, w którym na każdy dzień tego okresu zostawione było miejsce na krótki opis pogody. *Efemerydy* Müllera są jednym z najwcześniejszych drukowanych bestsellerów. W szesnastym wieku miały jedenaście wydań i ok. 100 000 sprzedanych egzemplarzy [4]. Pierwsze znane zapiski meteorologiczne są jeszcze wcześniejsze. Pochodzą z roku 1468 i są przechowywane w bibliotece uniwersyteckiej w Krakowie, skąd zresztą pochodzi znaczna część wartościowych materiałów historycznych dotyczących pogody. Warto podkreślić znaczący wkład do badań nad klimatem w okresach historycznych naukowców z Instytutu Geografii UJ oraz z krakowskiego oddziału Instytutu Impreza zorganizowana w ramach obchodów Dnia Ziemi 2008 przez Fundację Ośrodka Edukacji Ekologicznej. Na organizację Forum wsparcie zostało udzielone przez Islandię, Lichtenstein i Norwegię poprzez dofinansowanie ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego oraz budżetu Rzeczypospolitej Polskiej w ramach Funduszu dla Organizacji Pozarządowych.

Wkład prezentowany na Akademickim Forum: *Między Bali a Poznaniem. Polska wobec zmian Klimatu: Nauka – Gospodarka – Polityka – Społeczeństwo* prowadzonym przez - Uniwersytet Warszawski- Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Wszechnicę Polską – Szkołę Wyższą Towarzystwa Wiedzy Powszechnej, Katedrę Turystyki i Ekonomii.

Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

Wczesne zapiski wyrażają stan pogody w sposób jakościowy zawierając określenia takie jak „W Niedzielę Palmową roku 1468 było umiarkowanie chłodno”. Jakościowe obserwacje mogą być obiektywne i wartościowe jeśli kronikarz prowadzi zapiski systematycznie i dba o to, by używać jednakowych określeń na zbliżone warunki meteorologiczne. Nawet w takim idealnym przypadku próba nowoczesnej analizy długiej serii obserwacji wymaga przetłumaczenia kalendarzowych zapisków na język liczb. W rezultacie powstają, na kilka sposobów, wskaźniki pogody, które ujawniają wyraźne okresy ochłodzenia w XVI wieku, jak również ekstremalne lata 1540, 1573 i 1587 [5].

Bliższe współczesności obserwacje zmian klimatycznych opierają się nie na zapiskach subiektywnej oceny jakościowej lecz na wynikach różnorodnych pomiarów. W latach dziewięćdziesiątych pojawiły się doniesienia o nasilających się ekstremalnych zjawiskach meteorologicznych w rejonie północnego Atlantyku. Szczególnie gwałtowne sztormy i fale o nadzwyczajnej wysokości budziły niepokój tych, którzy upatrywali w nich objawy systematycznych zmian związanych z powodowanym przez człowieka globalnym ociepleniem. Prócz budzicieli ekologicznych sumień żywo interesowały się problemem firmy wydobywcze eksploatujące platformy wiertnicze na Morzu Północnym, a w szczególności ich ubezpieczyciele. Naukowa ocena zmian w nasileniu zjawisk ekstremalnych została wykonana przez międzynarodowy zespół badaczy w ramach projektu europejskiego WASA (Waves and Storms in the North Atlantic) z udziałem pracowników oddziału Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Gdyni. W opublikowanych wnioskach zespół WASA stwierdził, że nasilenie wysokich fal i gwałtownych sztormów w pobliżu wybrzeży Europy nie wykazuje w XX wieku statystycznie istotnych zmian [6]. Również numeryczne prognozy przyszłych globalnych zmian klimatycznych przy zakładanym podwojeniu stężenia CO₂ w atmosferze nie przewidują niepokojących zmian, choć należy podkreślić, że wiarygodność takich prognoz jest ograniczona.

Pomimo tego, że w XX wieku zgromadzono wielkie zbiory precyzyjnych klimatologicznych danych pomiarowych, które nie budzą metodologicznych zastrzeżeń, to ich interpretację trudno uogólniać, a wyciąganie wniosków wymaga ostrożności. Pomiarów temperatury powietrza w Arktyce prowadzone są od pierwszego Międzynarodowego Roku Polarnego 1882/1883. W XIX wieku działało pięć stacji pomiarowych, wszystkie znajdowały się na Grenlandii. W latach dwudziestych powstało kolejnych siedem stacji, a od lat pięćdziesiątych dysponujemy danymi z 37 stacji, które pozwalają badać nie tylko tendencje zmian temperatury w wybranych miejscach, ale również przestrzenny rozkład temperatur w regionie. Z przeprowadzonej w Zakładzie Klimatologii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika analizy dostępnych danych wynika, że najwyższe temperatury powietrza notowano w Arktyce w latach trzydziestych i nawet w latach pięćdziesiątych było tam cieplej niż dzisiaj. Pod koniec XX wieku impreza zorganizowana w ramach obchodów Dnia Ziemi 2008 przez Fundację Ośrodka Edukacji Ekologicznej. Na organizację Forum wsparcie zostało udzielone przez Islandię, Lichtenstein i Norwegię poprzez dofinansowanie ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego oraz budżetu Rzeczypospolitej Polskiej w ramach Funduszu dla Organizacji Pozarządowych.

Wkład prezentowany na Akademickim Forum: *Między Bali a Poznaniem. Polska wobec zmian Klimatu: Nauka – Gospodarka – Polityka – Społeczeństwo* prowadzonym przez - Uniwersytet Warszawski- Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Wszechnicę Polską – Szkołę Wyższą Towarzystwa Wiedzy Powszechnej, Katedrę Turystyki i Ekonomii.

zanotowano systematyczne ocieplenie, ale temperatura powietrza rośnie istotnie wolniej niż średnia temperatura na całym globie [7]. Z analizy danych wynika też, że w ostatnim dwudziestolecu ubiegłego wieku temperatura na Grenlandii była mniej więcej taka, jak pod koniec XIX wieku.

Takie fakty są często przytaczane przez „klimatosceptyków”, czyli tych którzy kwestionują realność globalnego ocieplenia. Wytykają oni naukowcom brak spójności w prezentowanych wnioskach i ogłaszanie sprzecznych wyników, które w pewnej części potwierdzają znaczące zmiany klimatu, a w innej im zaprzeczają. Takie stanowisko jest równie bezpodstawne jak postawa „klimatofanatyków” wieszczących nieuchronne kataklizmy, których ponoć możemy uniknąć wybierając jedynie słuszny, ekologiczny styl życia. Ci z kolei z zestawu wyników naukowych wybierają przeciwne skrajności na poparcie swojej tezy. Przykładem mogą tu być wyniki pomiarów opadów w ośmiu dużych krajach, które łącznie zajmują 40% powierzchni wszystkich lądów, a jeśli weźmiemy pod uwagę powierzchnię lądów poza strefą tropikalną, to aż 80%. Jak wynika z badań z udziałem Katedry Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Łódzkiego w ciągu stulecia ilość opadów w tych krajach wzrosła o około 5%, przy czym nie zwiększyła się ani liczba dni deszczowych, ani obszar, na którym opady występują, z czego wynika, że wzrasta ilość opadów skrajnie intensywnych [8], co wielu uznaje za świadectwo globalnego ocieplenia.

Istnienie pozornie sprzecznych wyników naukowych nie podważa *a priori* ich wiarygodności. Oznacza tylko, że nie są prawdziwe proste implikacje, które jesteśmy skłonni, mniej lub bardziej świadomie, uznawać za oczywiste. Ochładzanie powietrza w Arktyce może iść w parze z kurczeniem się zasięgu lodu, a pozorna sprzeczność powinna przede wszystkim stanowić bodziec do dalszego badania zjawisk, procesów i mechanizmów, które ewidentnie są znacznie bardziej skomplikowane niż mogło by się wydawać. Tym właśnie zajmuje się trzeci nurt badań nad klimatem.

Zmiany klimatu są przejawem wewnętrznej dynamiki niezwykle skomplikowanego układu jakim jest ziemska atmosfera sprzężona z hydrosferą. Zapewne jest on przez tę dynamikę zdeterminowany, ale nie oznacza to, niestety, że w dającej się przewidzieć przyszłości nauczymy się zmiany klimatu dokładnie prognozować. W ewolucji układów choć trochę złożonych może, jak wiadomo, panować chaos deterministyczny. Dwa stany początkowe, nawet tak do siebie podobne, że praktycznie nieodróżnialne, mogą podlegać całkiem różnym przemianom i po pewnym czasie wywoływać krańcowo odmienne skutki. Taka cecha dynamiki klimatu odbiera nadzieję na długoterminową prognozę, bo aktualny stan pogody i klimatu znamy tylko w przybliżeniu, a obliczać jego ewolucję możemy też tylko z pewną skończoną dokładnością, która choć w miarę udoskonalania komputerów coraz lepsza, to długo jeszcze będzie pozostawiała wiele do życzenia. Do wszystkich niedoskonałości naszych pomiarów i obliczeń dochodzi impreza zorganizowana w ramach obchodów Dnia Ziemi 2008 przez Fundację Ośrodka Edukacji Ekologicznej. Na organizację Forum wsparcie zostało udzielone przez Islandię, Lichtenstein i Norwegię poprzez dofinansowanie ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego oraz budżetu Rzeczypospolitej Polskiej w ramach Funduszu dla Organizacji Pozarządowych.

Wkład prezentowany na Akademickim Forum: *Między Bali a Poznaniem. Polska wobec zmian Klimatu: Nauka – Gospodarka – Polityka – Społeczeństwo* prowadzonym przez - Uniwersytet Warszawski- Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Wszechnicę Polską – Szkołę Wyższą Towarzystwa Wiedzy Powszechnej, Katedrę Turystyki i Ekonomii.

niepewność związana z ważnymi czynnikami zewnętrznymi, takimi jak wahania aktywności Słońca i strumienia energii, którą ono dostarcza, oraz niedokładna znajomość dynamiki wnętrza Ziemi, która też może wpływać na klimat poprzez zmiany strumienia geotermicznego, zmiany pola magnetycznego, aktywność wulkaniczną, czy wreszcie dynamikę płyt kontynentalnych.

Naukowcy uprawiający różne dyscypliny od dawna zajmują się wszystkimi aspektami zmian klimatu, zarówno ich dynamiką, jak i wspomnianymi czynnikami zewnętrznymi. Postęp badań jest ogromny, a jakość uzyskiwanych wyników coraz lepsza w miarę rozwoju nowoczesnych technik pomiarowych i wskutek zwiększania się w oszałamiającym tempie naszych możliwości przetwarzania informacji. Przeświadczenie o tym, że ziemski klimat może wykazywać ten rodzaj chaotycznego zachowania, który znamy z dużo prostszych układów fizycznych powoduje jednak, że w ostatnich dekadach szczególną uwagę skupia na sobie kwestia wpływu działalności człowieka na procesy klimatyczne. W istocie nie wiemy w jakim stopniu ten skomplikowany system jest wrażliwy na wprowadzane przez człowieka zakłócenia, ale właśnie niepokój wynikający z tej niewiedzy jest motorem naszego działania. Długoterminowych skutków czynników antropogenicznych nie poznamy na tyle, by nauczyć się prognozować zmiany klimatu. Do tego potrzebne byłyby dokładne obserwacje w okresach znacznie dłuższych niż dotychczasowa historia cywilizacji naukowo-technicznej. Jednak całkiem możliwe i pożądane, zarówno z naukowego, jak i społeczno-politycznego punktu widzenia jest badanie reguł rządzących dynamiką zmian klimatu i szczegółowe poznawanie ich fizycznego mechanizmu, a w tym rozstrzygnięcie co w skomplikowanym łańcuchu zależności i praw przyrody jest przyczyną, a co skutkiem.

Za główne antropogeniczne czynniki zmian klimatu uważa się emisję gazów cieplarnianych oraz wytwarzanie aerozolu, czyli stałych lub ciekłych drobin unoszących się w atmosferze. Gazy cieplarniane, a przede wszystkim dwutlenek węgla CO_2 i metan CH_4 przyczyniają się do podnoszenia średniej temperatury powierzchni Ziemi zwanego globalnym ociepleniem. Wytwarzany przez człowieka aerozol powoduje, na ogół, skutki przeciwne niż gazy cieplarniane chłodząc Ziemię bezpośrednio i pośrednio, aczkolwiek w pewnych sytuacjach może też sprzyjać ociepleniu. W światowych badaniach aerozolu atmosferycznego i jego wpływu na klimat aktywnie uczestniczy zespół Zakładu Fizyki Atmosfery Uniwersytetu Warszawskiego, który od wielu lat ściśle współpracuje z czołowymi grupami badawczymi na całym świecie, a w szczególności z NCAR (National Center for Atmospheric Research w Colorado), Laboratorium w Los Alamos, Uniwersytetem Kalifornijskim (UCSD), Laboratorium Marynarki USA (Naval Research Laboratory), Instytutami Maxa Plancka w Mainz i w Hamburgu, Météo-France, CNRM (Centre National de Recherche Météorologique), Wolnym Uniwersytetem w Berlinie (FUB), Brytyjskim Biurem Meteorologicznym (UK Met. Office) i wieloma innymi. Zespół ZFA bierze udział w najważniejszych światowych eksperymentach i kampaniach pomiarowych, takich jak impreza zorganizowana w ramach obchodów Dnia Ziemi 2008 przez Fundację Ośrodka Edukacji Ekologicznej. Na organizację Forum wsparcie zostało udzielone przez Islandię, Lichtenstein i Norwegię poprzez dofinansowanie ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego oraz budżetu Rzeczypospolitej Polskiej w ramach Funduszu dla Organizacji Pozarządowych.

Wkład prezentowany na Akademickim Forum: *Między Bali a Poznaniem. Polska wobec zmian Klimatu: Nauka – Gospodarka – Polityka – Społeczeństwo* prowadzonym przez - Uniwersytet Warszawski- Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Wszechnicę Polską – Szkołę Wyższą Towarzystwa Wiedzy Powszechnej, Katedrę Turystyki i Ekonomii.

INDOEX (Indian Ocean Experiment), ACE-I i ACE-II (Aerosol Characterization Experiment I i II), PACE (Parameterization of the Aerosol Indirect Climatic Effect), ACE-Asia (Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment) czy MINOS (Mediterranean Intensive Oxidant Study). Są to wspólne przedsięwzięcia dużych zespołów międzynarodowych, które zbierają wielkie ilości cennych danych analizowanych później przez kilka lat po zakończeniu eksperymentu.

Efekt cieplarniany spowodowany emisją CO₂ i innych gazów, których ilość przelicza się na równoważnik CO₂, czyli ilość dwutlenku węgla, która miałaby taki sam skutek klimatyczny, wydaje się zjawiskiem, które względnie łatwo zrozumieć, opisać i uwzględnić w modelach zmian klimatu. Ewidencja emisji jest dość dokładna, a główną trudność stanowi jej redukcja i jest to trudność o charakterze przede wszystkim polityczno-ekonomicznym. Znacznie trudniej zrozumieć wpływ aerozolu na klimat i jego zmiany. Jest to ważne zadanie, bo zmniejszanie zanieczyszczenia atmosfery aerozolem wytwarzanym przez człowieka jest w zasięgu naszych możliwości. Filtrowanie gazów wytwarzanych przez instalacje przemysłowe jest kosztowne, ale nie jest w tak fundamentalnym konflikcie z rozwojem przemysłu jak wymóg ograniczania emisji gazów cieplarnianych, które w dominujących dziś technologiach nieuchronnie towarzyszą pozyskiwaniu energii z paliw kopalnych. Wysiłki na rzecz zmniejszenia globalnej emisji aerozolu zależą jednak od tego, czy potrafimy zrozumieć rolę, jaką odgrywa aerosol antropogeniczny.

Miarą liczbową wkładu jakiegoś czynnika do zjawiska globalnego ocieplenia jest wskaźnik zwany *wymuszeniem radiacyjnym*, który mówi o ile ten czynnik zwiększa lub zmniejsza strumień energii docierający do powierzchni Ziemi. Ociepleniu klimatu sprzyja to, z czym wiąże się dodatnie wymuszenie radiacyjne. Na przykład wymuszenie radiacyjne powodowane produkowanym przez człowieka dwutlenkiem węgla ocenia się na około +1.6 W/m² (wat na metr kwadratowy). Natomiast sumaryczne wymuszenie radiacyjne związane z produkowanym przez człowieka aerozolem jest ujemne. Obecnie ocenia się je na około -1.2 W/m², a więc znaczenie aerozolu jest podobne jak gazów cieplarnianych, choć ich wpływ jest przeciwstawny. Aerosol antropogeniczny przeciwdziała globalnemu ociepleniu podobnie jak aerosol naturalny i pył pochodzenia na przykład wulkanicznego.

Aerosol na kilka sposobów zmienia strumień energii słonecznej ogrzewającej Ziemię. Po pierwsze odbija światło słoneczne, co nazywamy efektem bezpośrednim [9-12]. Prócz tego obecny w powietrzu aerosol ma duży wpływ na chmury, co nazywamy efektem pośrednim aerozolu. Stałe lub ciekłe drobiny stanowią tak zwane jądra kondensacji, których obfitość sprzyja powstawaniu kropelek chmurowych. Ułatwienie skraplania wody powoduje, że w chmurze jest dużo więcej kropelek, ale są one o wiele mniejsze. Taka chmura lepiej odbija światło słoneczne, mówimy, a to sprzyja chłodzeniu. Nazywamy to pierwszym efektem pośrednim aerozolu [13-15]. Impreza zorganizowana w ramach obchodów Dnia Ziemi 2008 przez Fundację Ośrodka Edukacji Ekologicznej. Na organizację Forum wsparcie zostało udzielone przez Islandię, Lichtenstein i Norwegię poprzez dofinansowanie ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego oraz budżetu Rzeczypospolitej Polskiej w ramach Funduszu dla Organizacji Pozarządowych.

Wkład prezentowany na Akademickim Forum: *Między Bali a Poznaniem. Polska wobec zmian Klimatu: Nauka – Gospodarka – Polityka – Społeczeństwo* prowadzonym przez - Uniwersytet Warszawski- Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Wszechnicę Polską – Szkołę Wyższą Towarzystwa Wiedzy Powszechnej, Katedrę Turystyki i Ekonomii.

Prócz zmian ilości odbitego od chmur światła aerozol zmienia też grubość warstwy chmur, wielkość powstającego z nich opadu, a także ilość chmur na niebie i czas ich trwania. Taki wpływ aerozolu na chmury, a za ich pośrednictwem na ogrzewanie, czy też ochładzanie Ziemi nazywamy drugim pośrednim efektem aerozolu [16].

Wprawdzie sumarycznym skutkiem obecności aerozolu jest chłodzenie, ale szczegółowy mechanizm jest skomplikowany i dlatego wciąż intensywnie badany. Zwykle aerozol chłodzi powierzchnię Ziemi, ale ogrzewa, choć w mniejszym stopniu, atmosferę [17], jednak w pewnych sytuacjach może również ogrzewać powierzchnię Ziemi. Dzieje się tak na przykład wtedy, gdy czarna sadza opada na biały śnieg [17], ale ogrzewać powierzchnię Ziemi może również aerozol unoszący się w powietrzu [18]. Te różnorodne sposoby zakłócania strumienia ciepła słonecznego skutkują nie tylko grzaniem lub chłodzeniem „netto”, ale również mają duży wpływ na dynamikę atmosfery, czyli na cyrkulację powietrza, rozkład i zmiany temperatury, wilgotności, opadów, etc.

Przewidywanie przyszłego klimatu opiera się na obliczeniach numerycznych za pomocą niezwykle zaawansowanych programów komputerowych zwanych Modelami Globalnej Cyrkulacji (Global Circulation Models – GCM). Programy te przez lata tworzone są i udoskonalane w największych ośrodkach badań atmosferycznych na świecie [19]. Wraz z postępem technologii informatycznych GCM obliczają stan ziemskiej atmosfery z uwzględnieniem coraz drobniejszych szczegółów i coraz większej liczby różnych mechanizmów fizycznych. Niektóre GCM obliczają jednocześnie ewolucję atmosfery oraz oceanów i mórz z uwzględnieniem wzajemnych związków pomiędzy atmosferą i hydrosferą. Modele GCM bywają też adaptowane do obliczeń regionalnych, na przykład obszaru zlewni Bałtyku, które mogą być znacznie dokładniejsze niż globalne obliczenia klimatyczne. Przykładem są prace z udziałem Instytutu Geofizyki PAN w ramach międzynarodowego programu badawczego BALTEX (Baltic Sea Experiment) [20]. Uwzględnienie w obliczeniach GCM skutków obecności aerozolu w atmosferze jest, jak można sobie wyobrazić, zadaniem trudnym, ale koniecznym. Największe trudności nastręcza poprawne modelowanie efektu pośredniego, które jest obecnie przedmiotem wielkiego zainteresowania [16]. Choć wiemy, że doraźnie aerozol *per saldo* naszą planetę ogrzewa, trudno *a priori* przewidzieć wszystkie długoterminowe skutki tego złożonego zjawiska, a dopiero wtedy możemy być pewni jego roli w procesie globalnego ocieplenia.

Wiedza o prehistorii, historii i mechanizmach zmian ziemskiego klimatu jest warunkiem zrozumienia co czeka nas w mniej i bardziej odległej przeszłości, choć długo jeszcze nie będziemy pewni trafności naszych przewidywań. W istocie jednak bardziej niż obiektywna charakterystyka przyszłego klimatu interesują nas warunki w jakich przyjdzie żyć następnym pokoleniom. Coraz więcej uwagi poświęcamy temu jak globalne ocieplenie zmieni nasze otoczenie, czyli środowisko w jakim żyjemy. Spodziewamy się zmian fizycznych, jak impreza zorganizowana w ramach obchodów Dnia Ziemi 2008 przez Fundację Ośrodka Edukacji Ekologicznej. Na organizację Forum wsparcie zostało udzielone przez Islandię, Lichtenstein i Norwegię poprzez dofinansowanie ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego oraz budżetu Rzeczypospolitej Polskiej w ramach Funduszu dla Organizacji Pozarządowych.

Wkład prezentowany na Akademickim Forum: *Między Bali a Poznaniem. Polska wobec zmian Klimatu: Nauka – Gospodarka – Polityka – Społeczeństwo* prowadzonym przez - Uniwersytet Warszawski- Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Wszechnicę Polską – Szkołę Wyższą Towarzystwa Wiedzy Powszechnej, Katedrę Turystyki i Ekonomii.

podniesienie poziomu mórz, a więc kurczenie się nadmorskich obszarów nadających się do zamieszkania, a także nasilenia zjawisk ekstremalnych, choć to nie jest chyba jeszcze przesądzone. Wielkim niepokojem napawa los otaczającej nas przyrody ożywionej. Coraz więcej wysiłku wkładamy w badanie wpływu zmian klimatu na bioróżnorodność. Zespół z Instytutu Oceanologii PAN w Sopocie badał pod tym kątem okolice Ziemi Franciszka Józefa i Spitsbergenu [21]. Rozwijane się badania wpływu zmian klimatu dla świata roślin i zwierząt. Instytut Dendrologii PAN uczestniczy w badaniach wpływu klimatu na liście roślin [22], zaś Zakład Ekologii Behawioralnej Uniwersytetu Adama Mickiewicza prowadzi badania nad dynamiką populacji ptaków [23].

Poważne zmiany w naszym środowisku wydają się nieuniknione. W znacznym stopniu są one od nas niezależne, ale warto zadbać o czyste sumienie i ograniczać szkodliwy wpływ działalności człowieka do minimum. Pesymistom warto też przypomnieć, że ocieplenie klimatu jest, być może szczęśliwszym z dwóch możliwych kierunków zmian, gdyż o wiele trudniej byłoby nam się przystosować do życia na planecie pokrytej lodem.

- [1] Araguas-Araguas, L.; Froehlich, K. & Rozanski, K. (1998), Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia, *J. Geophys. Res.* **103**(D22), 28721--28742.
- [2] Goslar, T.; Wohlfarth, B.; Bjorck, S.; Possnert, G. & Bjorck, J. (1999), Variations of atmospheric C-14 concentrations over the Allerod-Younger Dryas transition, *Climate Dyn.* **15**(1), 29--42.
- [3] Rinterknecht, V. R.; Clark, P. U.; Raisbeck, G. M.; Yiou, F.; Bitinas, A.; Brook, E. J.; Marks, L.; Zelcs, V.; Lunkka, J. P.; Pavlovskaya, I. E.; Piotrowski, J. A. & Raukas, A. (2006), The last deglaciation of the southeastern sector of the Scandinavian Ice Sheet, *Science* **311**(5766), 1449--1452.
- [4] Pfister, C.; Brazdil, R.; Rudiger, G. & Bokwa, A. (1999), Daily weather observations in Sixteenth-Century Europe', *Climatic Change* **43** (1) 111-150.
- [5] Glaser, R.; Brazdil, R.; Pfister, C.; Dobrovolny, P.; Vallve, M. B.; Bokwa, A.; Camuffo, D.; Kotyza, O.; Limanowka, D.; Racz, L. & Rodrigo, F. S. (1999), Seasonal temperature and precipitation fluctuations in selected parts of Europe during the sixteenth century, *Climatic Change* **43**(1), 169-200.
- [6] Carretero, J. C.; Gomez, M.; Lozano, I.; de Elvira, A. R.; Serrano, O.; Iden, K.; Reistad, M.; Reichardt, H.; Kharin, V.; Stolley, M.; von Storch, H.; Gunther, H.; Pfizenmayer, A.; Rosenthal, W.; Stawarz, M.; Schmith, T.; Kaas, E.; Li, T.; Alexandersson, H.; Beersma, J.; Bouws, E.; Komen, G.; Rider, K.; Flather, R.; Smith, J.; Bijl, W.; de Ronde, J.; Mietus, M.; Bauer, E.; Schmidt, H. & Langenberg, H. (1998), Changing waves and storms in the northeast Atlantic?, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **79**(5), 741--760.

Impreza zorganizowana w ramach obchodów Dnia Ziemi 2008 przez Fundację Ośrodka Edukacji Ekologicznej. Na organizację Forum wsparcie zostało udzielone przez Islandię, Lichtenstein i Norwegię poprzez dofinansowanie ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego oraz budżetu Rzeczypospolitej Polskiej w ramach Funduszu dla Organizacji Pozarządowych.

Wkład prezentowany na Akademickim Forum: *Między Bali a Poznaniem. Polska wobec zmian Klimatu: Nauka – Gospodarka – Polityka – Społeczeństwo* prowadzonym przez - Uniwersytet Warszawski- Uniwersyteckie Centrum Badan nad Środowiskiem Przyrodniczym i Wszechnicę Polską – Szkołę Wyższą Towarzystwa Wiedzy Powszechnej, Katedrę Turystyki i Ekonomii.

- [7] Przybylak, R. (2000), Temporal and spatial variation of surface air temperature over the period of instrumental observations in the Arctic, *Int. J. Climatol.* **20**(6), 587--614.
- [8] Groisman, P. Y.; Karl, T. R.; Easterling, D. R.; Knight, R. W.; Jamason, P. F.; Hennessy, K. J.; Suppiah, R.; Page, C. M.; Wibig, J.; Fortuniak, K.; Razuvaev, V. N.; Douglas, A.; Forland, E. & Zhai, P. M. (1999), Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change, *Climatic Change* **42**(1), 243--283.
- [9] Conant, W. C.; Seinfeld, J. H.; Wang, J.; Carmichael, G. R.; Tang, Y.; Uno, I.; Flatau, P. J.; Markowicz, K. M. & Quinn, P. K. (2003), A model for the radiative forcing during ACE-Asia derived from CIRPAS Twin Otter and R/V Ronald H. Brown data and comparison with observations, *J. Geophys. Res.* **108**(23).
- [10] Lelieveld, J.; Berresheim, H.; Borrmann, S.; Crutzen, P. J.; Dentener, F. J.; Fischer, H.; Feichter, J.; Flatau, P. J.; Heland, J.; Holzinger, R.; Korrmann, R.; Lawrence, M. G.; Levin, Z.; Markowicz, K. M.; N., M.; Minikin, A.; Ramanathan, V.; De Reus, M.; Roelofs, G. J.; Scheeren, H. A.; Sciare, J.; Schlager, H.; Schultz, M.; Siegmund, P.; Steil, B.; Stephanou, E. G.; Stier, P.; Traub, M.; Warneke, C.; Williams, J. & Ziereis, H. (2002), Global air pollution crossroads over the Mediterranean, *Science* **298**(5594), 794-799.
- [11] Markowicz, K. M.; Flatau, P. J.; Ramana, M. V.; Crutzen, P. J. & Ramanathan, V. (2002), Absorbing mediterranean aerosols lead to a large reduction in the solar radiation at the surface, *Geophys. Res. Lett.* **29**(20), 29-1.
- [12] Welton, E. J.; Voss, K. J.; Quinn, P. K.; Flatau, P. J.; Markowicz, K.; Campbell, J. R.; Spinhirne, J. D.; Gordon, H. R. & Johnson, J. E. (2002), Measurements of aerosol vertical profiles and optical properties during INDOEX 1999 using micropulse lidars, *J. Geophys. Res.* **107**(19).
- [13] Brenguier, J. ..; Pawlowska, H.; Schüller, L.; Preusker, R.; Fischer, J. & Fouquart, Y. (2000), Radiative properties of boundary layer clouds: Droplet effective radius versus number concentration, *J. Atmos. Sci.* **57**(6), 803-821.
- [14] Brenguier, J.; Pawłowska, H. & Schüller, L. (2003), Cloud microphysical and radiative properties for parameterization and satellite monitoring of the indirect effect of aerosol on climate, *J. Geophys. Res.* **108**(15), CMP 6-1 - CMP 6-14.
- [15] Menon, S; Brenguier, J.-L.; Boucher, O; Davison, P; Del Genio, A.D.; Feichter, J; Ghan, S; Guibert, S; Liu, X; Lohmann, U; Pawlowska, H; Penner, J.E.; Quaas, J; Roberts, D. L.; Schüller, L. & Snider, J. (2003), Evaluating aerosol/cloud/radiation process parameterizations with single-column models and Second Aerosol Characterization Experiment (ACE-2) cloudy column observations, *J. Geophys. Res.* **108**(24).
- [16] Pawlowska, H. & Brenguier, J. (2003), An observational study of drizzle formation in stratocumulus clouds for general circulation model (GCM) parameterizations, *J. Geophys.*

Impreza zorganizowana w ramach obchodów Dnia Ziemi 2008 przez Fundację Ośrodka Edukacji Ekologicznej. Na organizację Forum wsparcie zostało udzielone przez Islandię, Lichtenstein i Norwegię poprzez dofinansowanie ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego oraz budżetu Rzeczypospolitej Polskiej w ramach Funduszu dla Organizacji Pozarządowych.

Wkład prezentowany na Akademickim Forum: *Między Bali a Poznaniem. Polska wobec zmian Klimatu: Nauka – Gospodarka – Polityka – Społeczeństwo* prowadzonym przez - Uniwersytet Warszawski- Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Wszechnicę Polską – Szkołę Wyższą Towarzystwa Wiedzy Powszechnej, Katedrę Turystyki i Ekonomii.

Res. **108**(15).

- [17] Seinfeld, J. H.; Carmichael, G. R.; Arimoto, R.; Conant, W. C.; Brechtel, F. J.; Bates, T. S.; Cahill, T. A.; Clarke, A. D.; Doherty, S. J.; Flatau, P. J.; Huebert, B. J.; Kim, J.; Markowicz, K. M.; Quinn, P. K.; Russell, L. M.; Russell, P. B.; Shimizu, A.; Shinozuka, Y.; Song, C. H.; Tang, Y.; Uno, I.; Vogelmann, A. M.; Weber, R. J.; Woo, J. .. & Zhang, X. Y. (2004), ACE-ASIA: Regional climatic and atmospheric chemical effects of Asian dust and pollution, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **85**(3), 367-380.
- [18] Vogelmann, A. M.; Flatau, P. J.; Szczodrak, M.; Markowicz, K. M. & Minnett, P. J. (2003), Observations of large aerosol infrared forcing at the surface, *Geophys. Res. Lett.* **30**(12), 57-1.
- [19] Smolarkiewicz, P. K.; Margolin, L. G. & Wyszogrodzki, A. A. (2001), A class of nonhydrostatic global models, *J. Atmos. Sci.* **58**(4), 349--364.
- [20] Raschke, E.; Meywerk, J.; Warrach, K.; Andrea, U.; Bergstrom, S.; Beyrich, F.; Bosveld, F.; Bumke, K.; Fortelius, C.; Graham, L. P.; Gryning, S. E.; Halldin, S.; Hasse, L.; Heikinheimo, M.; Isemer, H. J.; Jacob, D.; Jauja, I.; Karlsson, K. G.; Keevallik, S.; Koistinen, J.; van Lammeren, A.; Lass, U.; Launianen, J.; Lehmann, A.; Liljebladh, B.; Lobmeyr, M.; Matthaus, W.; Mengelkamp, T.; Michelson, D. B.; Napiorkowski, J.; Omstedt, A.; Piechura, J.; Rockel, B.; Rubel, F.; Ruprecht, E.; Smedman, A. S. & Stigebrandt, A. (2001), The Baltic Sea Experiment (BALTEX): A European contribution to the investigation of the energy and water cycle over a large drainage basin, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **82**(11), 2389--2413.
- [21] Włodarska-Kowalczyk, M. & Weslawski, J. M. (2001), Impact of climate warming on Arctic benthic biodiversity: a case study of two Arctic glacial bays, *Climate Res.* **18**(1-2), 127--132.
- [22] Wright, I. J.; Reich, P. B.; Westoby, M.; Ackerly, D. D.; Baruch, Z.; Bongers, F.; Cavender-Bares, J.; Chapin, T.; Cornelissen, J. H. C.; Diemer, M.; Flexas, J.; Garnier, E.; Groom, P. K.; Gulias, J.; Hikosaka, K.; Lamont, B. B.; Lee, T.; Lee, W.; Lusk, C.; Midgley, J. J.; Navas, M. L.; Niinemets, U.; Oleksyn, J.; Osada, N.; Poorter, H.; Poot, P.; Prior, L.; Pyankov, V. I.; Roumet, C.; Thomas, S. C.; Tjoelker, M. G.; Veneklaas, E. J. & Villar, R. (2004), The worldwide leaf economics spectrum, *Nature* **428**(6985), 821--827.
- [23] Saether, B. E.; Lande, R.; Engen, S.; Weimerskirch, H.; Lillegard, M.; Altwegg, R.; Becker, P. H.; Bregnballe, T.; Brommer, J. E.; McCleery, R. H.; Merila, J.; Nyholm, E.; Rendell, W.; Robertson, R. R.; Tryjanowski, P. & Visser, M. E. (2005), Generation time and temporal scaling of bird population dynamics, *Nature* **436**(7047), 99--102.

Impreza zorganizowana w ramach obchodów Dnia Ziemi 2008 przez Fundację Ośrodka Edukacji Ekologicznej. Na organizację Forum wsparcie zostało udzielone przez Islandię, Lichtenstein i Norwegię poprzez dofinansowanie ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego oraz budżetu Rzeczypospolitej Polskiej w ramach Funduszu dla Organizacji Pozarządowych.