Nowy czujnik z wysokości 22 000 mil precyzyjnie śledzi zanieczyszczenia powietrza, aż do ich źródła

Co dokładnie znajduje się w powietrzu, którym oddychamy? W jaki sposób do tego doszło? Trudno uzyskać odpowiedzi na te podstawowe pytania.

W Stanach Zjednoczonych dane dotyczące jakości powietrza pochodzą głównie z sieci naziemnych czujników. W niektórych hrabstwach, które posiadają takie czujniki, zazwyczaj są one rozmieszczone w miastach i ich okolicach. Oznacza to, że nie rejestrują krótkotrwałych i szybko przemieszczających się zanieczyszczeń na obszarach wiejskich.

„W niektórych stanach mamy tylko jedną lub dwie stacje naziemne" – powiedział Xiong Liu, starszy fizyk i zastępca dyrektora ds. badań TEMPO w Obserwatorium Astrofizycznym Smithsonian oraz członek Centrum Astrofizyki | Harvard & Smithsonian. W innych częściach świata pozyskanie danych dotyczących zanieczyszczeń jest jeszcze trudniejsze.

Liu i jego zespół pracują nad rewolucyjnym sposobem monitorowania powietrza. W ciągu ostatnich kilku miesięcy opracowany przez nich instrument, nazwany TEMPO, zaczął mierzyć szkodliwe aerozole i gazy w atmosferze, takie jak dwutlenek azotu i ozon. W przyszłości będzie również monitorował inne zanieczyszczenia, takie jak dwutlenek siarki, tlenek bromku i formaldehyd. TEMPO działa na niespotykaną wcześniej skalę, monitorując jakość powietrza z wysokości 22 000 mil, co jest najwyższym dotąd punktem wykorzystywanym do pomiarów.

Smithsonian i NASA połączyły siły, aby stworzyć TEMPO. Nowy czujnik zanieczyszczenia powietrza, TEMPO to pierwsza z serii nisko kosztowych misji naukowych NASA, która wyznacza nowe standardy w monitorowaniu zanieczyszczeń z kosmosu. Pomoże ona wypełnić luki w sieciach naziemnych czujników, dostarczając dokładniejszych danych.

Kluczowe wnioski:

- Nowy czujnik kosmiczny NASA, TEMPO będzie tworzył codzienne mapy zanieczyszczeń powietrza, pokazując ich zmiany z dokładnością do dzielnic.
- TEMPO będzie monitorował główne zanieczyszczenia powietrza, takie jak dwutlenek azotu, ozon, dwutlenek siarki, formaldehyd i aerozole, pochodzące z takich źródeł jak samochody, rafinerie ropy naftowej i pożary.
- Dzięki dwukrotnie lepszej rozdzielczości niż obecne czujniki, TEMPO pozwoli naukowcom dokładniej śledzić zmiany jakości powietrza w ciągu dnia, co poprawi prognozy i badania związane z atmosferą i zdrowiem publicznym.

Nawet po dekadzie prac nad projektem, pierwsze obrazy z TEMPO zaskoczyły Liu. „Jesteśmy zdumieni ich szczegółowością," powiedział.

Istnieje już międzynarodowa flota satelitów monitorujących stan powietrza na niskiej orbicie okołoziemskiej. Na wysokości około 300 mil, prowadzą one obserwacje poruszając się wzdłuż swojej orbity, okrążając Ziemię raz dziennie. Instrumenty te łączą się ze stacjami naziemnymi w celu informowania o pomiarach, takich jak wskaźnik jakości powietrza (AQI) Agencji Ochrony Środowiska (EPA). Jednak, jak pokazały zeszłoroczne pożary w Ameryce Północnej, te pomiary mogą być niedokładne i docierać z opóźnieniem.

TEMPO to pierwszy instrument NASA do obserwacji Ziemi umieszczony na orbicie geostacjonarnej. Znajduje się znacznie

wyżej niż inne satelity i pozostaje nad jednym punktem nad Ziemią, co pozwala mu monitorować zanieczyszczenia przez dłuższy czas. Może on wykonywać od 10 do 14 skanów dziennie, obejmując obszary od Kanady po Półwysep Jukatan w Meksyku i od Oceanu Atlantyckiego po Pacyfik. TEMPO współpracuje z międzynarodowym zespołem naukowców z Kanady, Kuby, Meksyku i USA.

Tempo z jakim ten instrument skanuje Ziemię, mniej więcej co godzinę, przyczyniła się do nadania mu jego nazwy. „Będzie on praktycznie zawieszony nad równikiem i nieustannie z równym tempem będzie skanował Amerykę Północną, ze wschodu na zachód," wyjaśnił Liu.

Oprócz częstotliwości skanowania i dużej wysokości, najbardziej przełomową cechą TEMPO jest jego spektrometr. Dzięki wykrywaniu niewielkich różnic, gdy światło słoneczne uderza w cząsteczki w atmosferze i jest pochłaniane na określonych długościach fal, spektrometry pozwalają naukowcom mierzyć stężenia śladowych gazów w troposferze, czyli najniższej warstwie atmosfery. Jednak podczas gdy inne spektrometry kosmiczne w USA mogą rejestrować stężenia gazów w rozdzielczości co najwyżej wielkości miasta, TEMPO może obrazować powierzchnię około czterech mil kwadratowych, czyli mniej więcej wielkości centrum handlowego w Waszyngtonie.

W przyszłości, jak twierdzą naukowcy pracujący nad projektem TEMPO, dane z tego instrumentu mogą zastąpić mało precyzyjne mapy zanieczyszczeń czymś znacznie bardziej szczegółowym i dokładnym. Przykładowo tworzonym niemal w czasie rzeczywistym trójwymiarowym wideo jakości powietrza. „Teraz możemy zobaczyć małe, indywidualne źródła zanieczyszczeń w każdym mieście oraz godzinowe pomiary z autostrad, z uwzględnieniem ich zmian w ciągu dnia," powiedział Liu. „Jesteśmy w stanie dostrzec wiele szczegółów na poziomie dzielnicy."

Najbardziej Ucierpią Najbiedniejsze Społeczności

W ostatnich latach EPA, US Forest Service i inne organizacje próbowały poprawić mapy zanieczyszczeń, wykorzystując dane od obywateli, którzy monitorują jakość powietrza. Problem w tym, że takich urządzeń jest za mało, a monitory zwykle znajdują się w bogatszych dzielnicach. Dodatkowo, pomiary nie są wykonywane wystarczająco często, aby tworzyć dokładne prognozy zanieczyszczeń. W rezultacie zarówno czujniki kosmiczne, jak i naziemne dostarczają jedynie ograniczony obraz tego, jak zanieczyszczenie przemieszcza się w zmiennych warunkach pogodowych lub w jaki sposób wpływa na najbiedniejszych obywateli.

Według National Weather Service, **zanieczyszczone powietrze – przyziemny ozon i drobne cząstki (PM2.5) – powoduje ponad 100 000 przedwczesnych zgonów i miliardowe straty rocznie w USA**. Liu przytoczył statystyki z raportu American Lung Association z 2023 roku: „Jedna trzecia Amerykanów nadal cierpi z powodu szkodliwego zanieczyszczenia powietrza. Osoby z mniejszości etnicznych są bardziej narażone na zanieczyszczenie powietrza, ponieważ często mieszkają bliżej największych źródeł emisji.”

Najnowsze badania wykorzystały obserwacje satelitarne dwutlenku azotu do zidentyfikowania różnic w miastach, pokazując, że **wyższe emisje spalin występują w społecznościach o niższych dochodach i wśród mniejszości etnicznych**. Co ważne, TEMPO dostarcza dane o tak wysokiej rozdzielczości przestrzennej, że możliwe jest zidentyfikowanie rzeczywistych źródeł tych zanieczyszczeń. Łącząc te dane z wynikami pomiarów naziemnych i porównując je z danymi zdrowotnymi, epidemiolodzy mogą ustalić, jakie ilości i mieszanki zanieczyszczeń są powiązane z konkretnymi problemami zdrowotnymi, takimi jak powikłania w ciąży czy nowotwory.

Naukowcy z TEMPO mają nadzieję, że śledzenie źródeł

zanieczyszczeń i mapowanie ich wpływu na zdrowie pomoże w tworzeniu polityki, która ratuje życie, zmniejsza koszty opieki zdrowotnej oraz redukuje nierówności społeczne.

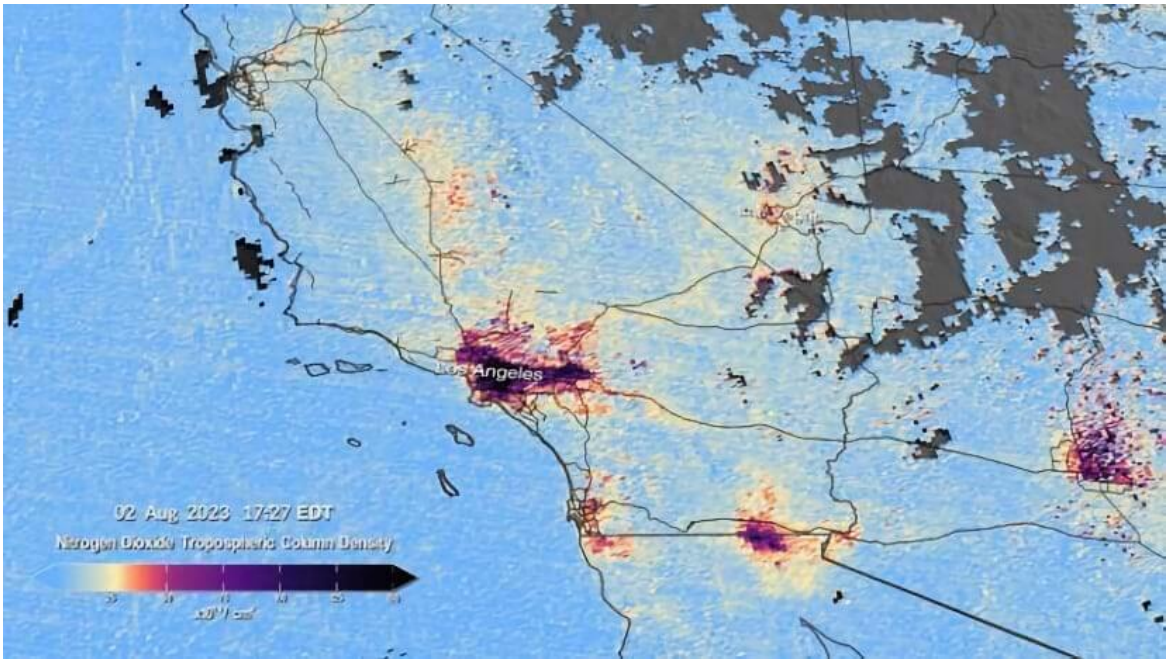
Kiedy w sierpniu pojawiły się pierwsze obrazy z TEMPO, administrator NASA, Bill Nelson, podkreślił potencjał projektu w zwiększaniu świadomości na temat groźnych zanieczyszczeń i w walce z nimi. „Dzięki przełomowym danym z TEMPO, dzielnice i społeczności w całym kraju będą czerpać korzyści przez wiele lat.”

Początek nowego przedsięwzięcia

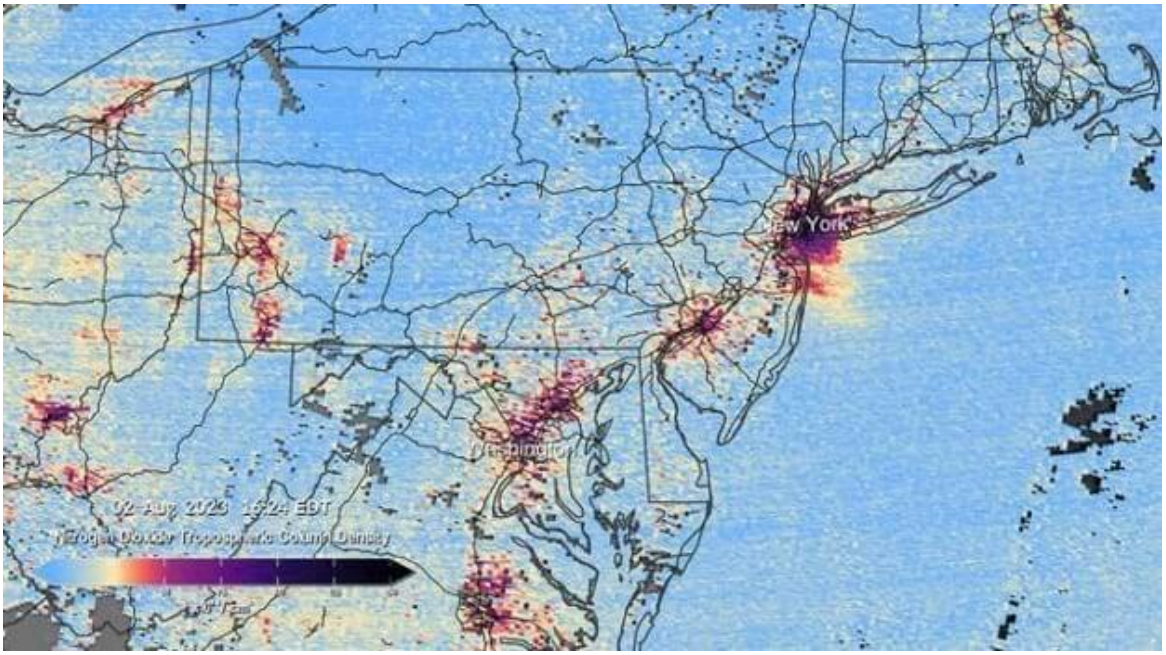
Kelly Chance, główny badacz TEMPO, już w 1985 roku, razem z europejskimi naukowcami, zaproponował **rozwój technologii spektroskopii kosmicznej, wykorzystującej ultrafiolet i światło widzialne, co doprowadziło do powstania TEMPO**.

Ten zaawansowany czujnik to także przełom w ziemskich projektach NASA. Jest pierwszym instrumentem w programie Earth Venture, który skupia się na innowacyjnych, niskokosztowych misjach naukowych. Projekt zatwierdzono w 2013 roku, a budowa rozpoczęła się w Ball Aerospace (obecnie BAE Systems) w Boulder, Kolorado. Po kilku opóźnieniach TEMPO zostało wystrzelone 7 kwietnia 2023 roku na rakiecie Falcon 9, przymocowane do satelity komunikacyjnego Intelsat 40e, zbudowanego przez firmę Maxar. Koszty projektu NASA oszacowała na około 210 milionów dolarów.

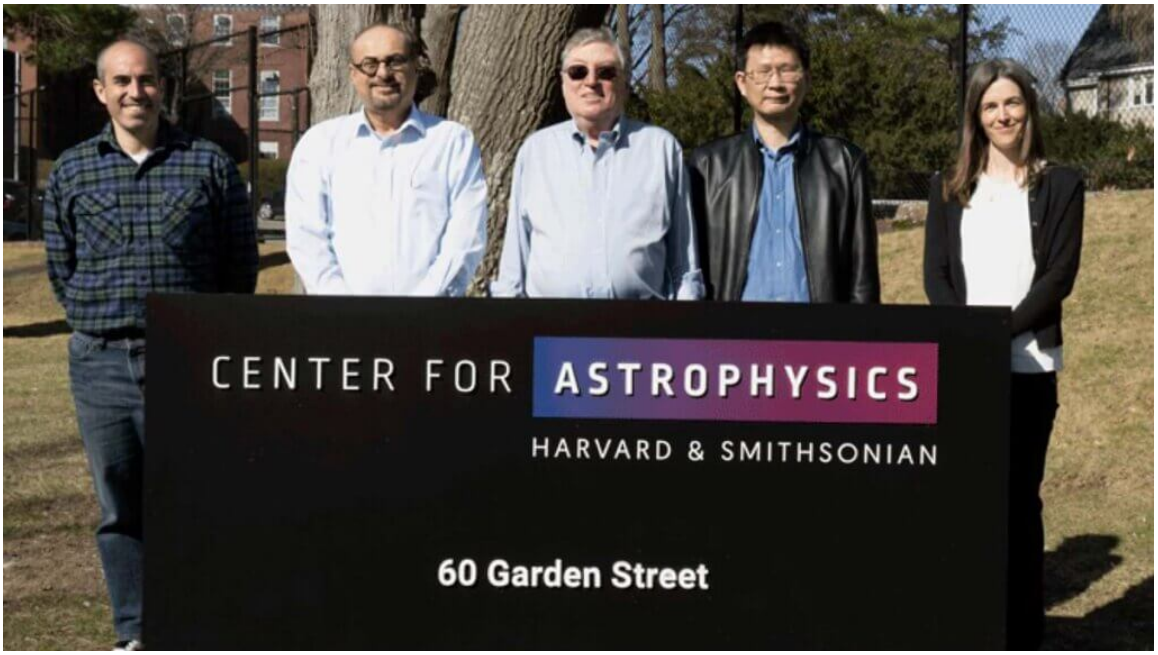
Misja TEMPO została początkowo sfinansowana na 20 miesięcy licząc od fazy uruchomienia. Jednak Liu wyjaśnił, że zespół współpracuje z NASA, aby przedłużyć jej czas trwania. Intelsat, właściciel satelity, na którym znajduje się TEMPO, planuje utrzymać go na orbicie przez nawet 15 lat. „Mamy nadzieję, że będziemy mogli prowadzić misję przez 10 do 15 lat, tak długo, jak instrument będzie sprawny,” powiedział Liu.



TEMPO zapewnia nowe poziomy wykrywania dwutlenku azotu. Ten obraz południowej Kalifornii z 2 sierpnia 2023 r. wskazuje na wpływ fali upałów na jakość powietrza. (Zdjęcie dzięki uprzejmości misji TEMPO)



Poziom dwutlenku azotu wzdłuż wschodniego wybrzeża, w tym w Waszyngtonie, również był podwyższony 2 sierpnia 2023 r. (Zdjęcie dzięki uprzejmości misji Tempo)



Kilku członków zespołu TEMPO Smithsonian Astrophysical Observatory. Od lewej: Gonzalo Gonzalez Abad, Raid Suleiman, Kelly Chance, Xiong Liu i Caroline Nowlan. (Zdjęcie dzięki uprzejmości Center for Astrophysics, Harvard & Smithsonian)

Rosnąca potrzeba zwiększenia świadomości na temat jakości powietrza

Walka o poprawę jakości powietrza w USA, rozpoczęta w 1970 roku dzięki nowelizacji ustawy Clean Air Act, przyniosła wiele sukcesów. Jednak w ostatnich latach postępy zaczęły wyhamowywać. Głównym powodem są coraz częstsze i bardziej intensywne pożary, które przyczyniają się do wzrostu drobnych cząstek zawieszonych w powietrzu i wyższego zanieczyszczenia ozonem. Zanieczyszczenie ozonem równie często wzrasta w dużych miastach po godzinach szczytu z powodu emisji samochodowych i długo utrzymuje się na wysokim poziomie.

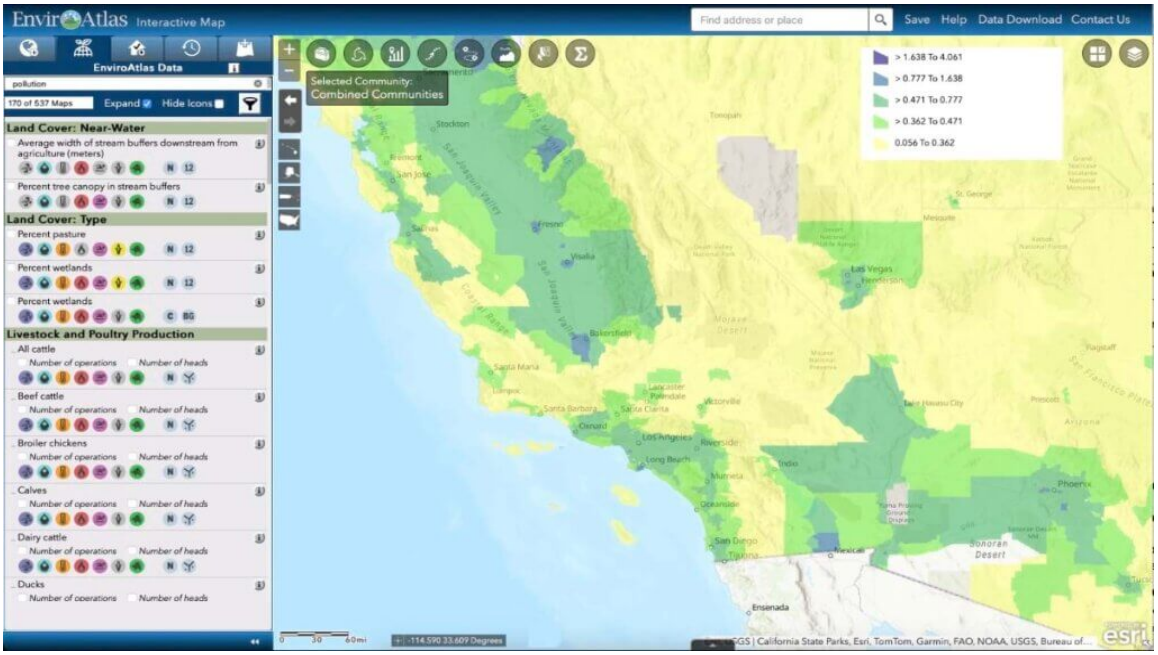
Głównym winowajcą jest dwutlenek azotu (NO2). Emitowany w wyniku spalania paliw i pożarów, działalności przemysłowej oraz nawożenia rolniczego. NO2 jest kluczowym składnikiem zanieczyszczenia ozonem i drobnymi cząstkami stałymi. Ozon występujący w wyższych partiach atmosfery – warstwie ozonowej

– chroni Ziemię przed niebezpiecznym promieniowaniem słonecznym. Jednak ozon w warstwie przyziemnej, będący głównym składnikiem smogu, może wywoływać choroby układu oddechowego.

Cząsteczki NO2 przemieszczają się w powietrzu, dlatego jego poziom może być szczególnie trudny do zmierzenia za pomocą istniejących stacji monitorujących. Fakt ten został potwierdzony w czerwcu, kiedy TEMPO zostało uruchomione. Tego samego dnia Liu otrzymał ostrzeżenie od Smithsonian Institution, gdy dym z kanadyjskich pożarów dotarł nad Waszyngton i inne miasta na północnym wschodzie.

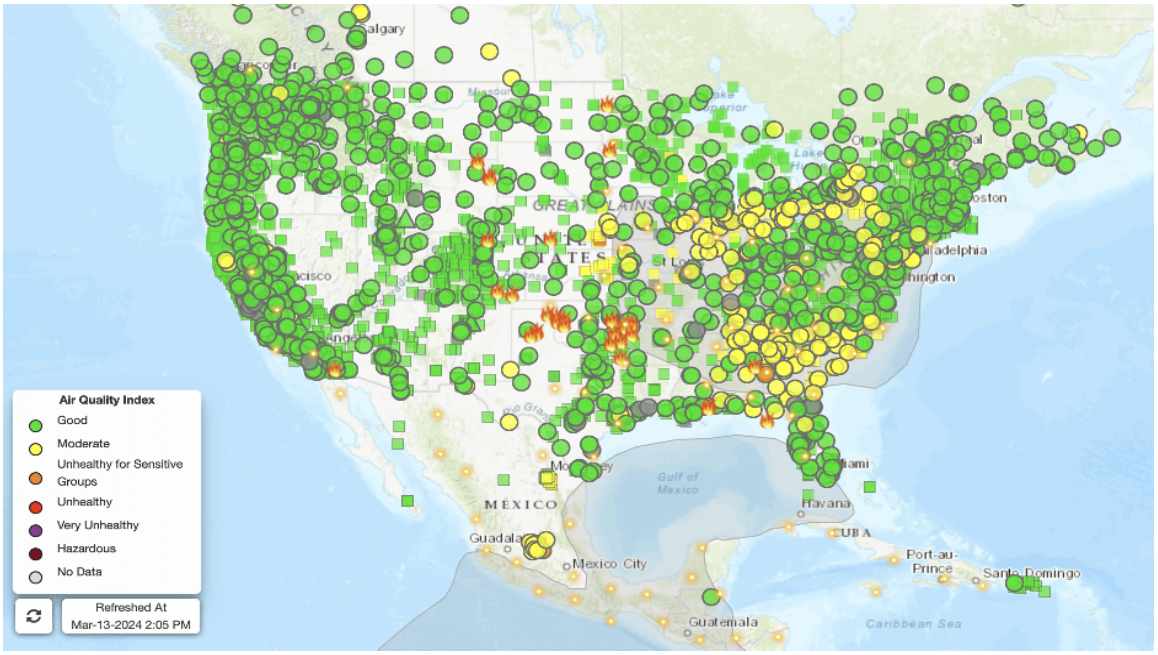
Pewnego gorącego dnia w lipcu, tysiące mil poniżej TEMPO, na ulicach Nowego Jorku, zespoły badaczy terenowych, które pomagają w weryfikacji i ulepszaniu danych TEMPO, zmierzyły się z zagrożeniem osobiście. Wyposażeni w aplikacje i plecaki pełne czujników, przez osiem godzin śledzili 1,5-milową smugę ozonu, która przemieszczała się z wiatrem nad Long Island Sound i wybrzeżem Connecticut, osiągając poziomy zanieczyszczenia powyżej tych, które EPA uznaje za bezpieczne.

„Wiele zanieczyszczeń może być transportowanych z regionu źródłowego na duże odległości, wpływając na zanieczyszczenie w innym miejscu” – powiedział Liu.



Mapy pomiaru zanieczyszczenia powietrza, w tym EnviroAtlas, będą wkrótce wyświetlać aktualizacje danych z czujnika Tempo, znacznie poprawiając dokładność pomiarów jakości powietrza.

Prognozy jakości powietrza, takie jak ta z AirNow z 14 marca 2024 r., zostaną zaktualizowane dzięki czujnikowi Tempo.



Wpływ pożarów na jakość powietrza, przedstawiony na mapie AirNow Fire and Smoke, będzie bardziej widoczny, dzięki danym Tempo.

Innym poważnym zagrożeniem jest pył PM2,5, składający się z mikroskopijnych cząstek, które mogą przedostawać się do krwiobiegu i powodować choroby serca i płuc, udary, a nawet przedwczesną śmierć.
Po latach spadku, poziom PM2,5 zaczął ponownie wzrastać około 2016 roku. Według EPA, gdy wskaźnik jakości powietrza (AQI) dla NO2 lub PM2.5 przekracza 100, powietrze staje się niezdrowe—najpierw dla wrażliwych osób, a później dla wszystkich, w miarę jak wskaźnik AQI rośnie.

TEMPO nie może bezpośrednio mierzyć PM2,5. Liu wskazuje, że ma on również inne ograniczenia. Zanieczyszczenia różnią się w zależności od wysokości, ale TEMPO mierzy tylko kolumny powietrza, które może wykryć
z góry. Nie działa też przy zachmurzonym niebie lub w nocy. (W ciemności TEMPO będzie używany do pomiaru zanieczyszczenia światłem).

Mimo to, bardziej precyzyjne dane z TEMPO dotyczące lokalizacji i składu chemicznego zanieczyszczeń pomogą stworzyć lepsze modele i prognozy zanieczyszczeń. „Jest duże zainteresowanie wykorzystaniem sztucznej inteligencji i

algorytmów uczenia maszynowego do szybszego i bardziej efektywnego określania stężeń PM2.5 i ozonu na powierzchni—czyli określenie tzw indeksu jakości powietrza," powiedział Liu. Jednak zastrzega, że „ten proces będzie prawdopodobnie czasochłonny."

Pierwsze testowe dane z TEMPO dotyczące spektrów promieniowania zostały opublikowane w lutym. Główne dane o śladowych gazach, jak mówi Liu, zostały udostępnione w kwietniu 2024 roku, a kolejne dane są planowane na nadchodzące lata. **Dane z TEMPO są teraz dostępne w ArcGIS Living Atlas, a także na stronach NASA, takich jak Atmospheric Science Data Center i Earthdata Search.**

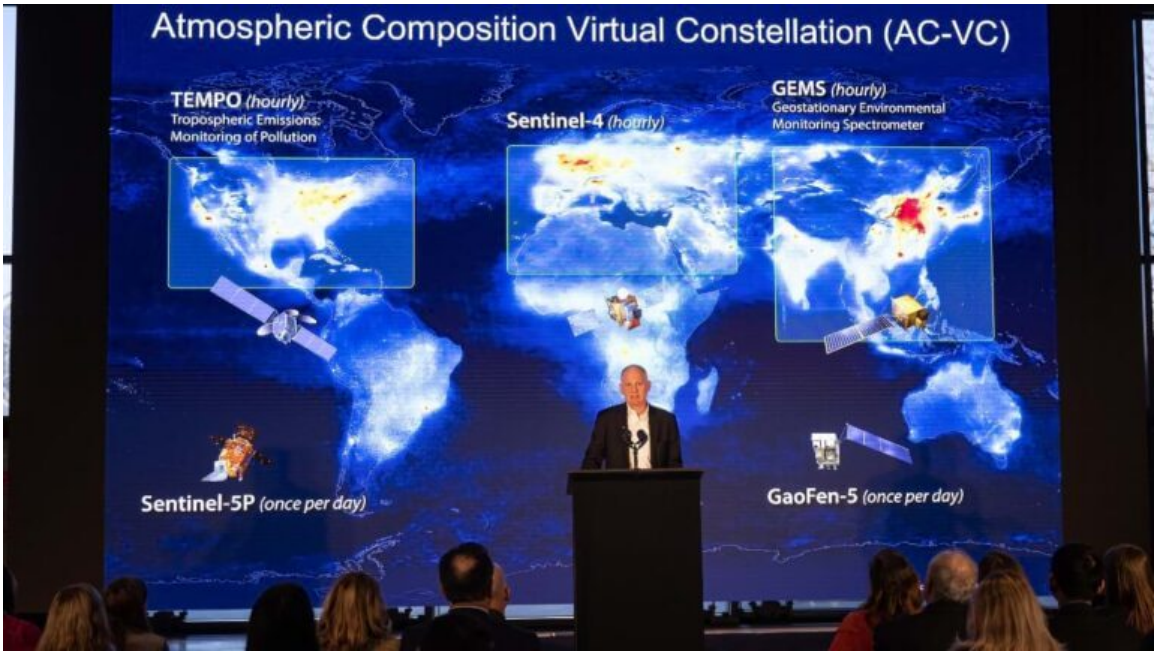
Będą również dostępne poprzez narzędzie RSIG, które umożliwia użytkownikom wybór dużych zbiorów danych, ich integrację i analizę w systemach takich jak technologia systemu informacji geograficznej (GIS).

Liu i jego zespół ciężko pracują nad publicznym udostępnieniem kolejnych danych. Są wspierani przez aktywną społeczność ponad 600 pierwszych użytkowników, w tym agencje rządowe, organizacje zdrowia publicznego i organizacje pozarządowe (NGO). Pomagają oni zespołowi TEMPO w walidacji danych i przekazują informacje zwrotne, przygotowując się do wykorzystania ich w badaniach atmosfery i zdrowia publicznego.

TEMPO będzie również stanowić część rosnącej wirtualnej konstelacji geostacjonarnych satelitów monitorujących jakość powietrza na półkuli północnej. Dołączy do południowokoreańskiego spektrometru GEMS, wystrzelonego w 2020 roku, oraz satelity Sentinel-4 Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA), który ma zostać wystrzelony w 2025 roku. Mimo to większość globalnej mapy jakości powietrza pozostaje niepełna, zwłaszcza nad Ameryką Południową i Afryką. Liu i inni naukowcy naciskają na umieszczenie podobnych instrumentów nad Bliskim Wschodem i Afryką Południową. „Obecnie istnieje duże

zainteresowanie społeczne, aby wdrażać takie pomiary na półkuli południowej," powiedział Liu.

Zanieczyszczone powietrze zabija co roku miliony ludzi, ale Liu dostrzega, że coś się zmienia. Coraz więcej osób zaczyna zwracać uwagę na niebo i jakość powietrza, sprawdza aplikacje pogodowe i zadaje pytania. Narzędzia takie jak TEMPO mogą przyspieszyć tę zmianę. „Jeśli chodzi o jakość powietrza i pomiary gazów cieplarnianych," powiedział Liu, „wydaje mi się, że jesteśmy w kluczowym momencie, w którym możemy naprawdę coś zmienić."



Barry Lefer, kierownik programu składu troposfery w Earth Science Division w Science Mission Directorate NASA, przemawia podczas briefingu na temat TEMPO NASA, wtorek, 14 marca 2023 r. w Smithsonian's National Air and Space Museum w Waszyngtonie. (Autor: Joel Kowsky, dzięki uprzejmości NASA)

Zwiększone monitorowanie jakości powietrza i plany na przyszłość

Coraz więcej danych o zanieczyszczeniach napływa z całego świata. Poprzednik TEMPO, GEMS, od 2020 roku obserwuje wzorce

zanieczyszczeń w Azji. Oba instrumenty są podobne, ale TEMPO ma mniej redundantnych części i potrafi mierzyć widzialne spektrum światła. W 2025 roku do TEMPO i GEMS dołączy Sentinel-4, obejmując Europę i północną Afrykę. Ta wirtualna konstelacja umożliwi naukowcom śledzenie zanieczyszczeń na całej półkuli północnej.

W połowie lat 30. XX wieku NOAA planuje wystrzelenie Atmospheric Composition Instrument (ACX), następcy TEMPO, który będzie monitorować centralne Stany Zjednoczone. ACX będzie hiperspektralnym spektrometrem, mierzącym szerokie spektrum światła, podobnie jak TEMPO.

Inne potężne instrumenty do monitorowania zanieczyszczeń są już w drodze na orbitę. W marcu Environmental Defense Fund wystrzelił **MethaneSAT, który monitoruje emisje metanu z pól naftowych i gazowych**. NASA i Włoska Agencja Kosmiczna przygotowują instrument **Multi-Angle Imager for Aerosols (MAIA), który będzie badać cząstki stałe w powietrzu nad 11 wielkimi miastami, w tym Los Angeles i Tel Awiwem**, aby zrozumieć, jak zanieczyszczenia wpływają na zdrowie.