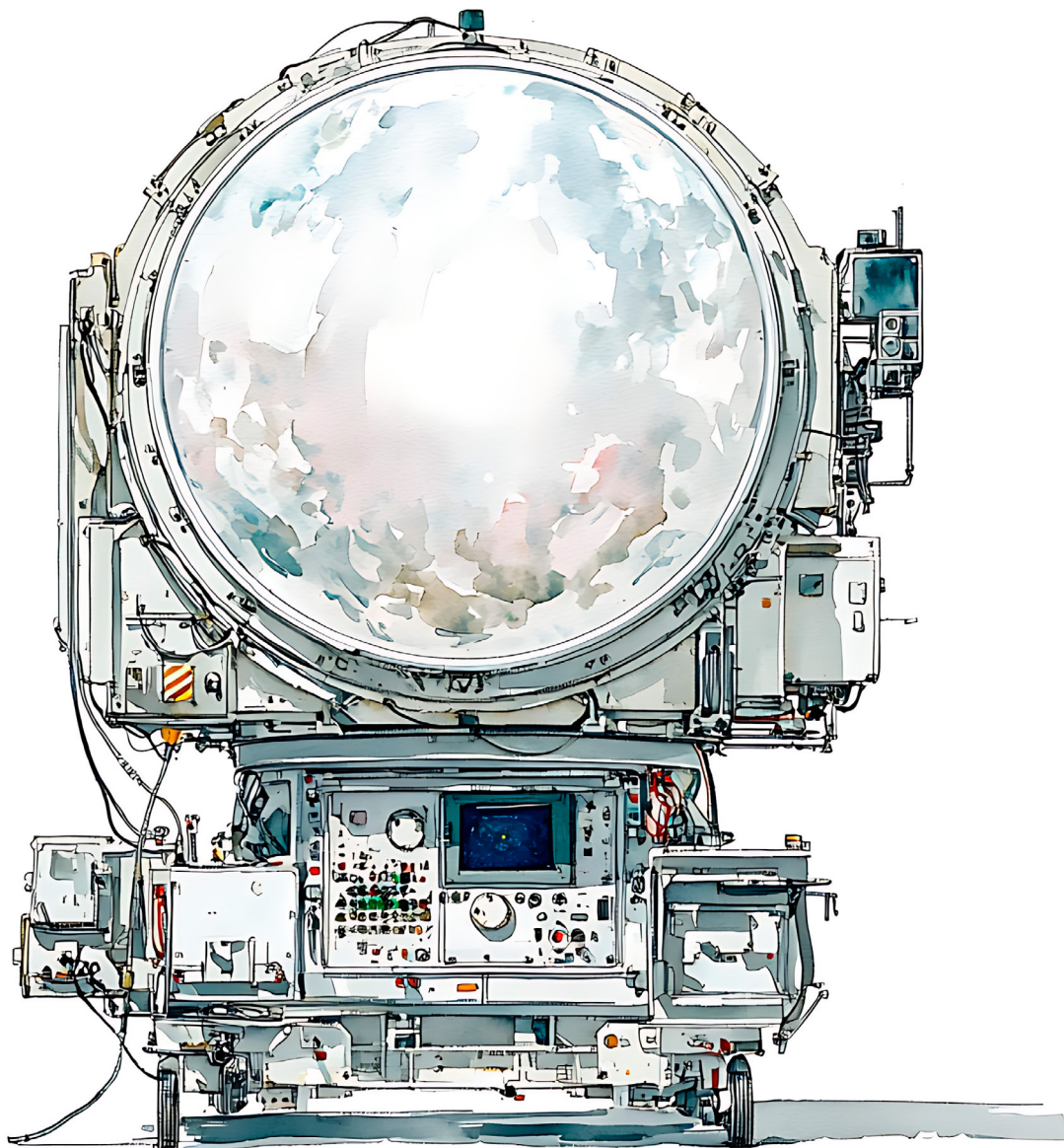


Obserwator



Ziemia w pikselach i algorytmach

Jak technologia nauczyła nas widzieć więcej

W NUMERZE:

3 prognozy potwierdzone naukowo
Między falą a decyzją – jak przewidzieć,
gdzie uderzy powódź

8 mądry przed szkodą
Nie buduj w ciemno – rola modeli
hydraulicznych w ochronie
przed powodzią

14 zimna woda
Satelitarna detekcja spiętrzeń lodowych
– analiza zdarzenia z 2021 roku

19 bezpieczeństwo to priorytet
Teledetekcja oraz GIS w monitoringu
wałów przeciwpowodziowych

24 mapy i obrazy
Wiedza zakodowana w kolorze –
zobaczyć to, co ukryte

28 modele xxi wieku
Czy AI wspomůže szybsze
i jakościowe prognozowanie pogody?

34 elektroniczna sieć zmysłów
Pogoda w cyfrowym świecie:
jak Internet Rzeczy zmienia meteorologię

Obserwator

Gazeta Obserwatora ISSN: 2658-2716

Wydawca: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
01-673 Warszawa, ul. Podleśna 61 | www.imgw.pl

Magazyn Obserwator dostępny jest również w wersji online: <https://obserwator.imgw.pl/>

Zespół Redakcyjny: Zespół Komunikacji IMGW-PIB

Redaktor Naczelny: Rafał Stepnowski

Projekt graficzny i skład: Michał Seredin

Kontakt do redakcji: content@imgw.pl

Zdjęcie na okładce: watz | stock.adobe.com

Redakcja nie zwraca materiałów niezamówionych, zastrzega sobie prawo do skrótów, adiustacji i redagowania nadesłanych tekstów. Wszystkie materiały publikowane w Obserwator (Gazeta Obserwatora ISSN: 2658-2716) mogą być przedrukowywane wyłącznie za zgodą redakcji. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za treść zamieszczanych reklam i ogłoszeń.



Jeszcze sto lat temu głównym źródłem naszej wiedzy o Ziemi była obserwacja i intuicja. Mierzylśmy to, co widzialne i możliwe do uchwycenia prostymi narzędziami. Wyjaśnialiśmy zjawiska bazując na doświadczeniu i mądrości naszych przodków. Dziś widzimy więcej – z satelitów dostrzegamy struktury chmur, za pośrednictwem radarów śledzimy opady w czasie rzeczywistym, a dzięki czujnikom jesteśmy w stanie zaobserwować zmiany zachodzące w ekosystemie rzeki, gleby czy lasu. Sieci pomiarowe są coraz gęstsze, a technologie obserwacji coraz bardziej złożone, precyzyjne i zautomatyzowane. Zbieramy dane o opadach, temperaturze, parowaniu, pokrywie śnieżnej, wilgotności gleby czy zmianach pokrycia terenu – nieprzerwanie, w wysokiej rozdzielczości, w skali całej planety.

Dzięki tym wszystkim narzędziom uzyskaliśmy dostęp do nadzwyczajnej ilości informacji. Jednak prawdziwy przełom dokonał się, gdy technologia połączyła się z analityką i z milionów punktów zaczął wyłaniać się zrozumiały obraz powiązań i zależności. Wówczas mogliśmy zacząć wyjaśniać subtelne korelacje między przebiegiem prądów oceanicznych a klimatem, wylesianiem a zmianami albedo, intensywnością opadów a urbanizacją. Tam, gdzie człowiek widzi złożoność, algorytm potrafi rozpoznać wzorzec. Dziś do utkania tego obrazu naukowcy coraz częściej wykorzystują sztuczną inteligencję – zwłaszcza uczenie maszynowe i sieci neuronowe, pozwalające analizować dane szybciej i wychwytywać ukryte zależności w złożonych, wielowymiarowych zbiorach, których klasyczne narzędzia analizy nie były w stanie ujawnić.

Rozwój technologii – od sensorów po sztuczną inteligencję – nie zastępuje nauki, lecz czyni ją jeszcze bardziej precyzyjną i odpowiedzialną. To nie tylko wgląd w mechanizmy rządzące systemami Ziemi, ale też realna możliwość prognozowania zjawisk ekstremalnych: fal upałów, susz, powodzi czy ryzyka pożarowego. To klucz do zarządzania przyszłością – nie intuicyjnie, lecz świadomie, w oparciu o modele, dane i scenariusze.

Nauki o Ziemi przechodzą dziś cichą rewolucję, napędzaną przez satelity, czujniki, modele i algorytmy, które uczą się świata. Ta rewolucja nie dzieje się w laboratoriach, tylko tu i teraz, nad naszymi głowami, pod naszymi stopami, w rzekach, morzach i oceanach. To kolejny krok przesuwały granice ludzkości, pozwalający przekształcać pionierskie wizje w rzeczywistość i spoglądać w przyszłość ze świadomością tego, że dzisiejsze decyzje ukształtują przyszłość planety na pokolenia.

Rafał Stepnowski

Między falą a decyzją – jak przewidzieć, gdzie uderzy powódź

Dokładna prognoza zagrożenia powodziowego wymaga integracji różnych narzędzi modelowania – zarówno matematycznych modeli hydrodynamicznych, hydrologicznych, jak i statystycznych. Modele hybrydowe stosowane w IMGW-PIB umożliwiają uchwycenie złożoności zjawisk hydrologicznych i zredukowanie niepewności prognoz. Są one bardziej precyzyjne w prognozowaniu lokalnych zagrożeń, co jest kluczowe przy planowaniu działań ochronnych i zarządzaniu kryzysowym. Ten technologiczny postęp nie byłby możliwy bez zwiększenia dostępności do danych – radarowych, telemetrycznych i satelitarnych – oraz ciągłego rozwoju metod numerycznych i algorytmów.

Albert Malinger, Justyna Czarnańska, Maksymilian Rybacki, Magdalena Pawlak, Marta Bedryj | IMGW-PIB/Centrum Modelowania Powodziowego i Suszy w Poznaniu, Biuro Modelowania Powodziowego i Suszy¹



Opracowane i wykorzystywane w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej jednowymiarowe, hydrauliczne modele prognostyczne IMGW HD, obejmują ponad 10 tys. km odcinków rzek, w tym 5,8 tys. km fragmentów obwałowanych.

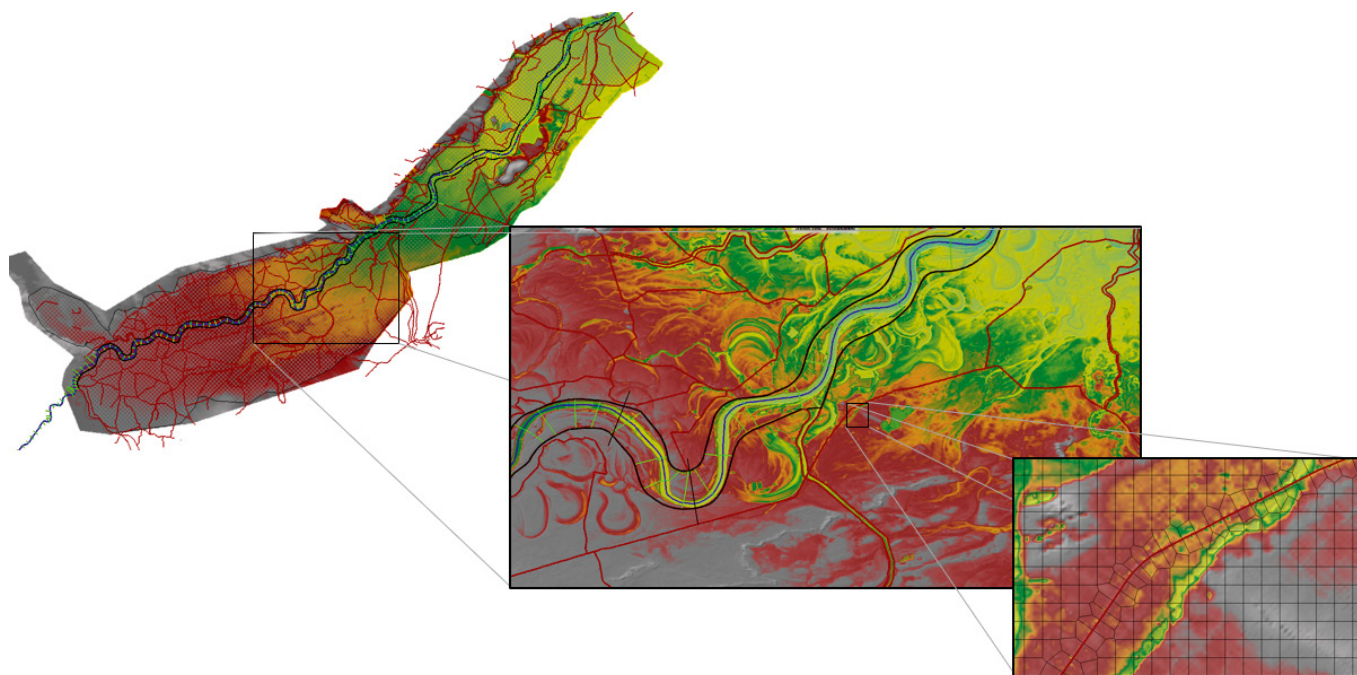
Uruchamiane w trybie operacyjnym, umożliwiają wykonywanie szybkich obliczeń (co najmniej 8 razy na dobę), na podstawie których wykonuje się prognozy stanów wody i przepływów, a dla wybranych lokalizacji także zasię-

gu zwierciadła wody w sąsiedztwie rzek i w tzw. międzywałach. W sytuacjach nadzwyczajnych te klasyczne narzędzia wspomagane są modelami hybrydowymi, będącymi połączeniem modeli jedno- i dwuwymiarowych. Dzięki integracji danych eksperci z IMGW-PIB mogą przewidywać przestrzenny i czasowy przebieg fali powodziowej (tzw. propagację) będącej skutkiem awarii wału oraz szacować poziom zagrożenia i ryzyka powodziowego. W procesie tym spełnione muszą być rygorystyczne wymagania jakościowe, które uzyskuje się poprzez odpowiednią budowę modelu i dobór jego wymiarowości, jak również wykorzystanie wydajnego środowiska umożliwiającego prowadzenie obliczeń.

BUDOWA, KALIBRACJA I TESTY MODELU EKSPERYMENTALNEGO

Po powodzi, która wystąpiła w Polsce w maju i czerwcu 2010 roku zidentyfikowano co najmniej 80 przypadków awarii wałów przeciwpowodziowych. Jednym z najpoważniejszych było przerwanie obwałowań Wisły w rejonie miejscowości Świniary (23.05). Na skutek tego zdarzenia pod wodą znalazło się ponad 20 miejscowości, ewakuowano niemal 2,5 tys. osób. Zebrane wówczas dane obserwacyjne i terenowe wykorzystano w IMGW-PIB

¹ Przygotowując niniejszy artykuł, korzystaliśmy z kilkudziesięciu pozycji literatury naukowej, materiałów i informacji udostępnionych przez Powiatowe Centrum Zarządzania Kryzysowego w Płocku, informacji ogólnodostępnych w Internecie dotyczących awarii wału w Świniarach oraz materiałów własnych uwzględniających poruszoną problematykę. Zdjęcie na pierwszej stronie artykułu publikujemy dzięki uprzejmości pracowników WZMIUW RO w Koninie.



Wizualizacja siatki obliczeniowej wraz ze zmodyfikowanymi bokami komórek obliczeniowych modelu hybrydowego – odcinek Wisły w rejonie Sandomierza.

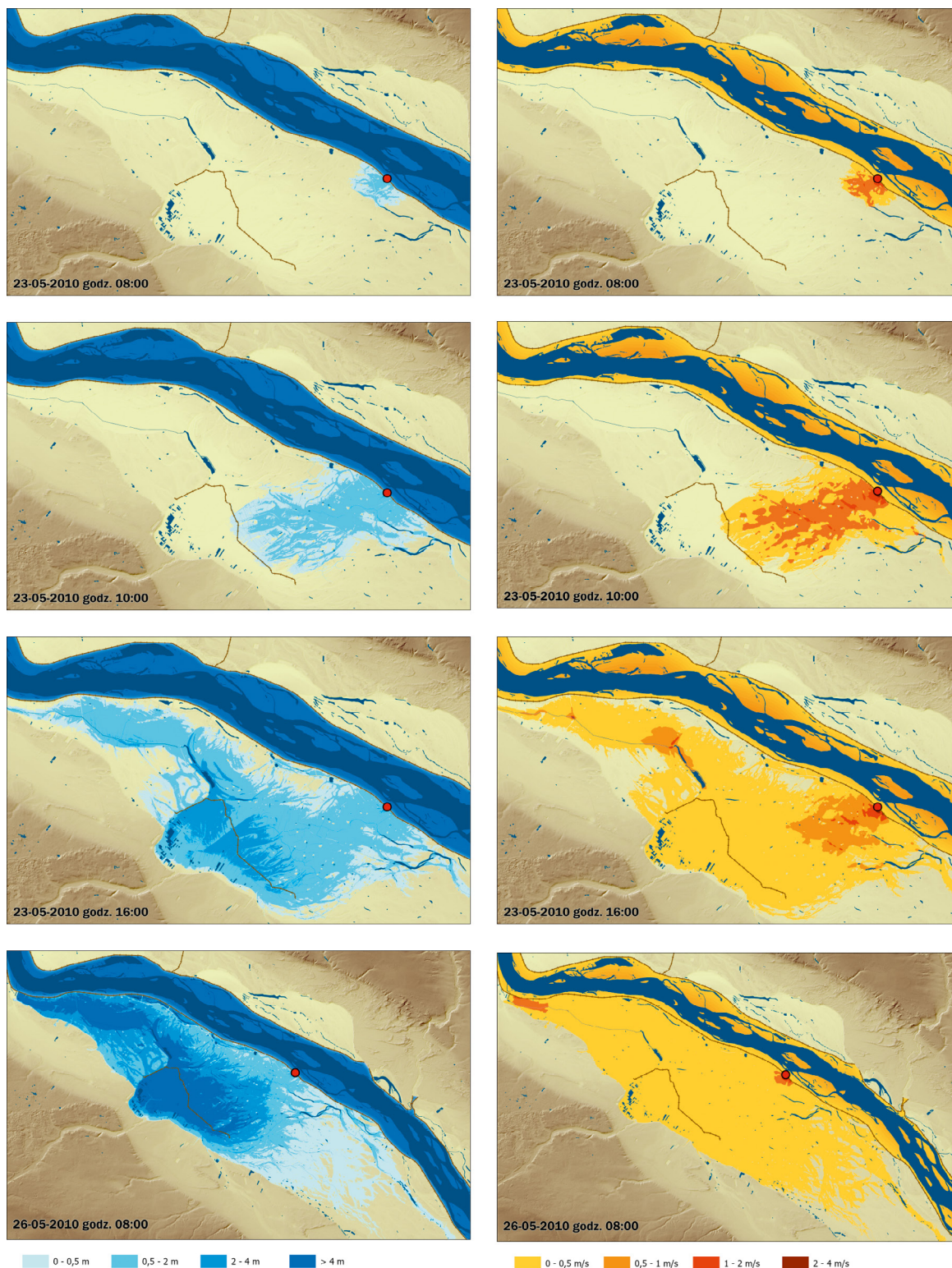
do testowej budowy i kalibracji modelu dla ok. 80-kilometrowego odcinka Wisły, tj. od profilu wodowskazowego w Wysogrodzie do zapory Zbiornika Włocławek. Celem było stworzenie narzędzia, które umożliwi szybkie i skuteczne prognozowanie tego typu zjawisk. Wymagania te spełniał hydrodynamiczny model hybrydowy, charakteryzujący się nie tylko bardzo krótkim czasem obliczeń, ale również szerokim spektrum danych wynikowych zgodnych ze specyfiką gwałtownego napływu wody na terenie zawalą na skutek awarii wału. Jednowymiarową część modelu (1D) stanowiło koryto główne oraz tereny zalewowe w bezpośrednim sąsiedztwie koryta – reprezentowane w postaci przekrojów obliczeniowych. W domenie modelu dwuwymiarowego (2D) znalazł się obszar położony po odpowietrznej stronie wałów przeciwpowodziowych, zdefiniowany na podstawie numerycznego modelu terenu z lotniczego skaningu laserowego (LiDAR). Bardziej szczegółowe informacje dotyczące parametrów zastosowanego modelu oraz zakresu danych wykorzystanych w proce-

sie jego kalibracji przedstawiono w artykule „Modele powodziowe – jak skutecznie prognozować i chronić”, który ukazał się na łamach magazynu Obserwator we wrześniu 2024 roku.

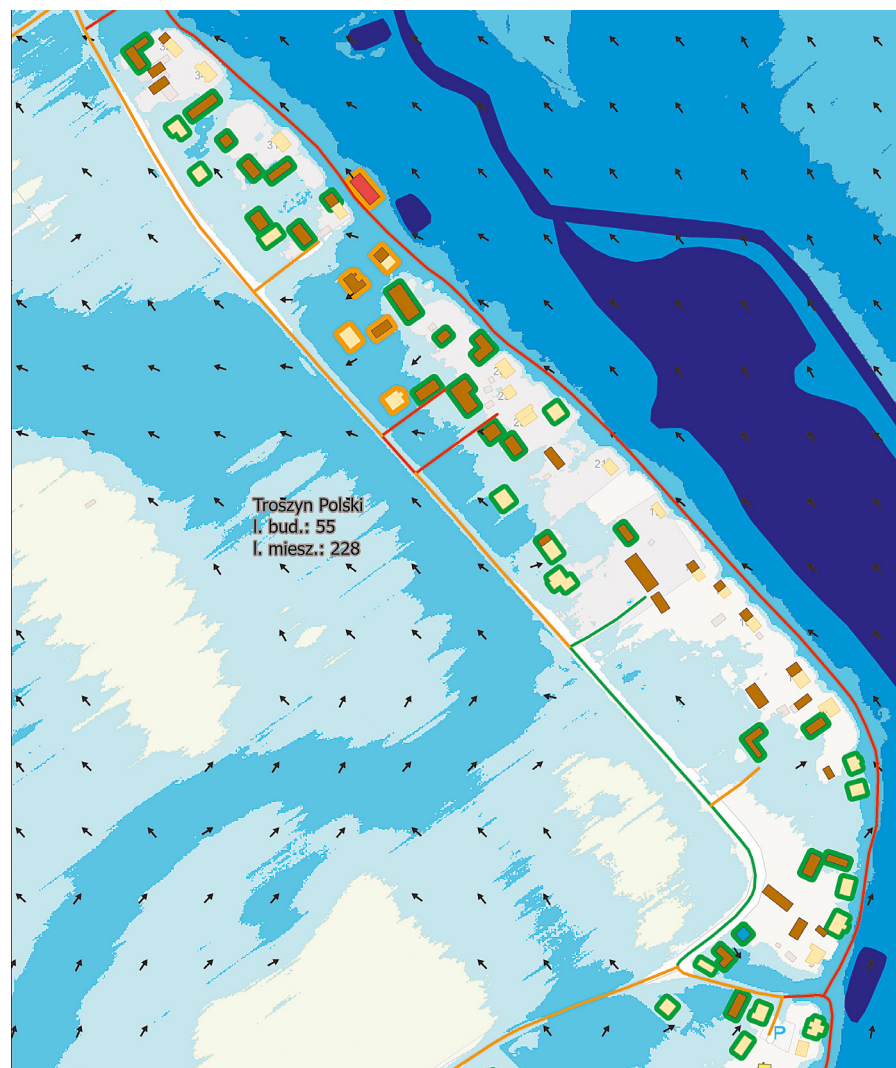
Przeprowadzone testy umożliwiły wskazanie kluczowych elementów modelu, m.in. przekrojów obliczeniowych oraz budowli mostowych i hydrotechnicznych, umożliwiających jego operacyjne wykorzystanie. Nie mniej istotny okazał się sposób implementacji batymetrii obliczeniowej domeny 2D. Funkcjonalność wykorzystanego modelu umożliwiła utworzenie regularnej, prostokątnej siatki obliczeniowej, która następnie podlegała przekształceniu. Modyfikacja ta polegała na odpowiednim dopasowaniu boków komórek obliczeniowych, w szczególności w miejscach lokalizacji obiektów liniowych, takich jak wały przeciwpowodziowe, groble czy nasypy drogowe, istotnych z punktu widzenia propagacji fali powodziowej. Zabieg ten pozwolił na ograniczenie ilości komórek w domenie obliczeniowej, a jednocześnie

nie przyczynił się do skrócenia czasu obliczeń modelu.

Przeprowadzone testy wykazały również, że jednym z kluczowych wymogów dla operacyjnego zastosowania modeli hybrydowych jest właściwa implementacja danych na temat wyłomu w wale przeciwpowodziowym – jego dokładnej lokalizacji, szerokości i czasu tworzenia. Niestety ze względu na dynamikę zjawiska parametry te są trudne, a czasem wręcz niemożliwe do pozyskania w czasie umożliwiającym ich operacyjne wykorzystanie. Rozwiązaniem okazały się wzory empiryczne – dzięki porównaniu danych o całkowitej szerokości 76 wyłomów, powstałych w obwałowaniach podczas powodzi w 2010 roku, z wynikami obliczeń matematycznych wskazano zależności, które najlepiej odzwierciedlały rzeczywistość. Uzyskane funkcje pomyślnie zweryfikowano w modelu testowym awarii wału przeciwpowodziowego w rejonie miejscowości Świniary – tym samym potwierdzono ich operacyjne zastosowanie do określania podstawowych



Propagacja fali wezbraniowej na zawalu z uwzględnieniem informacji o głębokościach i prędkościach przepływu – próba odtworzenia sytuacji z 2010 roku. Czerwonym punktem wskazano miejsce awarii wału przeciwpowodziowego w pobliżu miejscowości Świniary. W legendzie przedstawiono przedziały głębokości wody (po lewej) i prędkości wody (po prawej) na zawalu. W obszarze międzywala przedziałów głębokości i prędkości nie wyznaczono.



Wizualizacje budynków w podziale na ich funkcję wraz z określonym poziomem ryzyka powodziowego oraz przejezdności dróg na zalanym obszarze z kierunkami przepływu.

Objaśnienia znaków

funkcja budynków

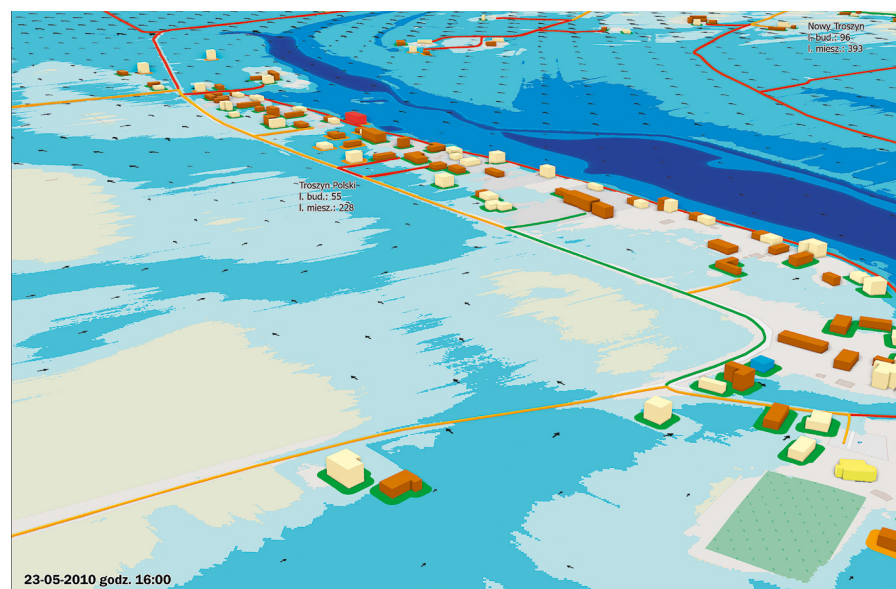
- straż pożarna
- budynki handlowo-usługowe
- budynki mieszkalne
- budynki oświaty, sportowe
- budynki gospodarcze, produkcyjne
- budynki przemysłowe
- budynki transportu, łączności
- pozostałe budynki

ryzyko dla budynków

- małe
- średnie
- wysokie

przejezdność dróg

- droga niezalana
- droga zalana nieprzejezdna
- droga zalana z możliwym przejazdem
- kierunek przepływu wody



parametrów wyłomu w początkowej fazie obliczeń.

OKREŚLENIE ZASIĘGU POWODZI

Modele hybrydowe stanowią istotne wsparcie dla modeli operacyjnych IMGW HD – szczególnie podczas zdarzeń kryzysowych – ale ich zastosowanie jest znacznie szersze. Pozwalają bowiem pozyskiwać dane o przewidywanym rozwoju zdarzeń w trybie operacyjnym oraz umożliwiają zobrazowanie przewidywanej propagacji fali wezbraniowej i wyodrębnienie informacji o rozkładzie przestrzennym głębokości, uśrednionych w pionie prędkości przepływu, a także maksymalnym zasięgu powodzi. Dlatego docelowo IMGW-PIB planuje budowę modeli hybrydowych dla wszystkich odcinków rzek, na których prowadzone są obserwacje wodowskazowe Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej. Przykładowe wizualizacje propagacji fali wezbraniowej, wraz z uwzględnieniem informacji o rozkładzie głębokości i prędkości, przedstawiono na mapach. Zobrazowania powstały na przykładzie wyników analizy ex post awarii wału przeciwpowodziowego w rejonie miejscowości Świnia.

WSKAZANIE ELEMENTÓW RYZYKA POWODZIOWEGO

Określenie zasięgu powodzi jest informacją niewystarczającą do właściwego reagowania na zagrożenie, w szczególności na obszarach zamieszkałych. Dlatego w IMGW-PIB testom poddano procedury umożliwiające operacyjne przeprowadzenie szerszych analiz, w których pod uwagę bierze się obecność budynków czy infrastruktury drogowej – to identyfikacja tzw. ryzyka powodziowego. Zgodnie z klasycznym podejściem, ryzyko powodziowe określa się jako kombinację prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi i związanych z nią potencjalnych negatywnych konsekwencji, określanych dla czterech podstawowych kategorii, tj.: zdrowia ludzkiego, środowiska, dziedzictwa kulturowego oraz działalności gospodarczej. W praktyce przyjmuje się, że na ryzyko powodziowe składa się zagrożenie (zasięg powodzi), ekspozycja (obiekty i społeczności na zagrożonym terenie) oraz wrażliwość (stopień

przygotowania obiektów i społeczności do powodzi lub ich podatność).

Dla testowanego obszaru w rejonie Świnia przeprowadzono analizy identyfikacji ryzyka powodziowego, biorąc pod uwagę specyfikę tego zdarzenia oraz możliwość jego wyznaczenia w trybie operacyjnym. Z tego względu ryzyko powodziowe określono w sposób uproszczony, tj. jako funkcję zagrożenia powodziowego oraz ekspozycji z uwzględnieniem budynków zlokalizowanych na obszarze wystąpienia powodzi. Do identyfikacji zagrożenia wykorzystano najwyższy, obliczony poziom zwierciadła wody, który wystąpił w tym rejonie. Uwzględniono nie tylko zasięg przestrzenny powodzi, ale również informacje o maksymalnych głębokościach oraz prędkościach przepływu w bezpośrednim otoczeniu każdego budynku. Mając do dyspozycji dane dotyczące głębokości i uśrednionej w pionie prędkości przepływu, zdefiniowano zależności klasyfikujące negatywne oddziaływanie napływającej wody na obiekty budowlane. Wartości obu tych parametrów zostały podzielone na klasy (z uwzględnieniem odpowiednich przedziałów wartości), a kombinacjom klas głębokości i prędkości przepływu przypisano odpowiedni poziom tzw. wskaźnika negatywnego oddziaływania zagrożenia powodziowego W (ang. impact parameter), co umożliwiło wyodrębnienie trzech poziomów – niskiego, średniego i wysokiego.

Po wyznaczeniu zasięgu powodzi możliwa była identyfikacja znajdujących się w jej granicach budynków z funkcją: mieszkalną, oświatową i sportową, gospodarczą i produkcyjną, przemysłową, transportową i łączności, handlowo-usługową, pozostałą. Powiązanie danych o poziomie negatywnego oddziaływania zagrożenia powodziowego (W) z lokalizacją budynków pozwoliło na wskazanie poziomu ryzyka powodziowego dla poszczególnych obiektów. Na grafikach przedstawiono przykładowe wizualizacje zasięgu obszaru powodzi wraz z przedziałami głębokości wody oraz kierunkami przepływu. Każdy z budynków, który znajduje się choćby częściowo w zagrożonym rejonie, oznaczony został buforem – jego kolor ozna-

cza poziom ryzyka powodziowego (małe, średnie, wysokie). Im wyższy poziom, tym większe negatywne konsekwencje powodzi i związane z nimi potencjalne straty.

WSPRACIE DLA SŁUŻB KRYZYSOWYCH

W trakcie testowego modelowania analizą objęto również budynki nie należące bezpośrednio do zasięgu powodzi, ale zlokalizowane w bliskim otoczeniu. Dla tych obiektów nie wyznaczano poziomu ryzyka powodziowego – kluczowa była natomiast informacja czy znajdują się one na terenach odciętych komunikacyjnie, z których ewakuacja może być utrudniona. W procesie analizy uwzględniono szacunkową liczbę mieszkańców i istniejącą infrastrukturę drogową (z rozróżnieniem jakości nawierzchni), które następnie powiązano z danymi dotyczącymi maksymalnych głębokości, jakie wystąpiły podczas powodzi. Umożliwiło to wskazanie odcinków dróg, które nie zostały zalane (kolor zielony), fragmentów zalanych do 0,3 m (z możliwością przejazdu np. samochodów osobowych – kolor żółty) oraz ponad 0,3 m (bez możliwości przejazdu samochodów osobowych – kolor czerwony). Dodatkowo, w ramach opracowanej procedury, przewidziano operacyjne przygotowanie raportów zawierających syntetyczne informacje dotyczące m.in. szacunkowej liczby zagrożonych osób, dane o budynkach, ich adresach oraz prognozowanym poziomie ryzyka powodziowego. Należy zaznaczyć, że podobne analizy mogą być prowadzone w trybie operacyjnym na innych odcinkach rzek, dla których opracowane zostaną hybrydowe modele hydrauliczne.

Mimo, że od powodzi w 2010 roku i wydarzeń w rejonie Świnia minęło blisko 15 lat, ostatnie zdarzenia z września 2024 roku zdają się potwierdzać, że przedstawiona problematyka może być nieistoty w dalszym ciągu aktualna. Rozwój narzędzi prognostycznych, takich jak hydrodynamiczne modele hybrydowe, daje realną szansę na to, abyśmy w przyszłości byli lepiej przygotowani na powódź – od jej prognozowania, poprzez informowanie i ostrzeganie, po wspieranie służb różnego szczebla w podejmowaniu trafnych decyzji. ◀

Nie buduj w ciemno – rola modeli hydraulicznych w ochronie przed powodzią

Jak zaplanować przestrzeń, w której będziemy czuć się bezpiecznie, a potencjalne skutki powodzi zostaną ograniczone do minimum? Jednym z najbardziej precyzyjnych narzędzi umożliwiających właściwą ocenę zagrożenia powodziowego jest obecnie modelowanie hydrauliczne. Dysponujemy coraz szerszym wyborem oprogramowania i coraz bardziej zaawansowanymi możliwościami prezentacji wyników. Na rynku funkcjonuje wiele odpłatnych platform, ale również – co warto podkreślić – oprogramowania bezpłatne, które nie ustępują swoim komercyjnym odpowiednikom. Umiejętność wykorzystania tych narzędzi, a może przede wszystkim ich produktów, jest dziś kluczem do odpowiedzialnego planowania i zarządzania przestrzennego.

Beata Letkiewicz, Monika Mykita, Paweł Wilkosz | IMGW-PIB | Centrum Hydrologicznej Ochrony Kraju/Biuro Modelowania Powodziowego i Suszy, Centrum Modelowania Powodziowego i Suszy w Gdyni

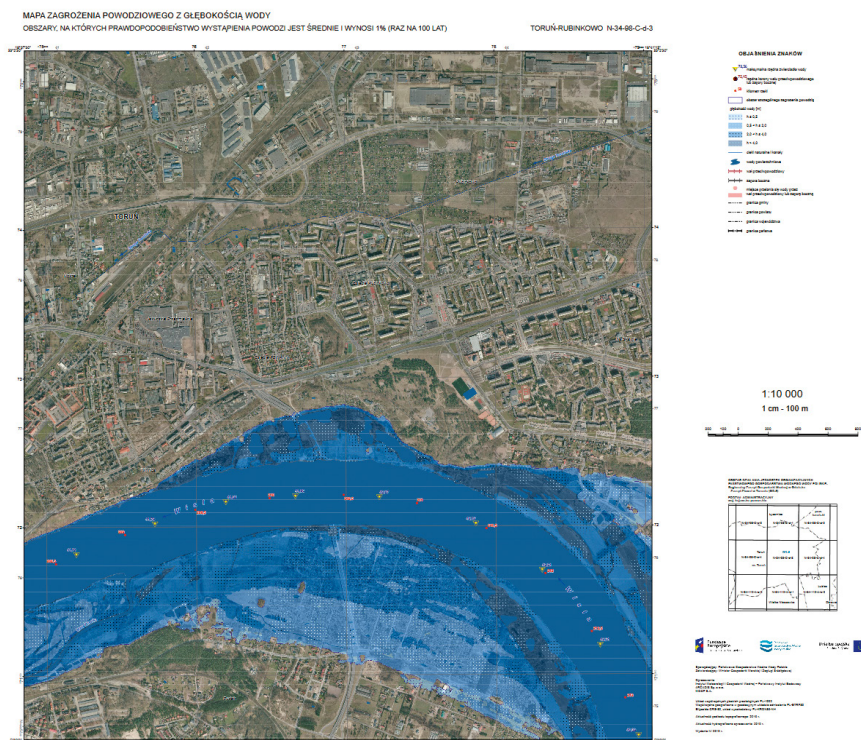


Modelowanie hydrauliczne to proces żmudny i wymagający odpowiedniej wiedzy i przygotowania¹. Już na samym początku trzeba dokonać wyboru odpowiedniego typu modelu hydraulicznego – jest to zależne od rodzaju terenu, dla którego wykonuje się modelowanie oraz oczekiwanej dokładności informacji, którą chcemy uzyskać. Stosuje się modele jednowymiarowe (1D) oraz dwuwymiarowe (2D) lub modele hybrydowe (1D/2D), zalecane zwłaszcza dla obszarów zurbanizowanych lub o skomplikowanym ukształtowaniu terenów zalewowych, a także dla powodzi od morza.

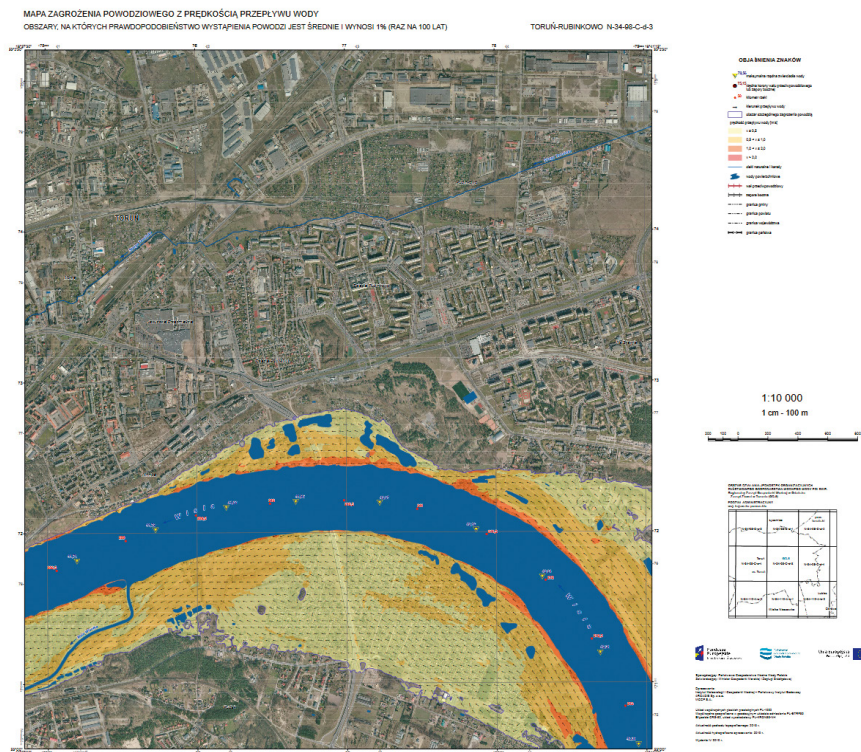
Produktem modelowania hydraulicznego są informacje o rzędnych zwierciadła wody. Te z pozoru skromne dane wymagają jeszcze odpowiedniej obróbki, aby ukazać ich wyjątkowy potencjał. I tak na przykład, jeśli z modelu 1D chcemy uzyskać przestrzenny rozkład zasięgu obszaru zagrożenia powodziowego oraz odpowiadające mu głębokości wody, stosuje się dodatkowe procedury wykorzystujące zaawansowane narzędzia GIS. Te same informacje, ale przy znacznie mniejszym nakładzie pracy w środowisku GIS, generują modele 2D, dzięki którym dodatkowo otrzymujemy wektory prędkości przepływu wody. Choć wyniki modeli dwuwymiarowych są dokładniejsze i wynikają z tego dodatkowe korzyści, to wymagają one dłuższego czasu przygotowania i przeprowadzania obliczeń. W ten sposób powstaje kompletny obraz zasięgu, skali i wielkości powodzi o zadanych parametrach wejściowych, które można modyfikować w zależności od uwarunkowań rzeczywistych. Wszystkie wskazane wyżej elementy pomagają w ocenie zagrożenia powodziowego, są więc przydatne w różnego rodzaju analizach wymagających takiej oceny, tj. przede wszystkim w pracach planistycznych².

KONIEC MODELOWANIA I CO DALEJ?

Jednym z podstawowych produktów opracowywanych na podstawie wyników modelowania są mapy zagrożenia



Mapa zagrożenia powodziowego z głębokością wody, Toruń, rzeka Wisła.
Źródło: https://wody.isok.gov.pl/imap_kzgw/?gmap=gpPDF.



Mapa zagrożenia powodziowego z prędkością wody, Toruń, rzeka Wisła.
Źródło: https://wody.isok.gov.pl/imap_kzgw/?gmap=gpPDF.

¹ Letkiewicz B., Miłkowski M., Poczułt K., 2021, Od pomiarów hydrologiczno-meteorologicznych do map zagrożenia powodziowego od morza, Obserwator.
² Malingier A., Szalkiewicz E., 2021, Modelowanie powodzi rzecznych, Obserwator.

powodziowego (MZP) – dokumenty planistyczne planowania w gospodarowaniu wodami, za sporządzenie których odpowiedzialne są Wody Polskie. MZP w dwóch wersjach, z głębokościami wody oraz z prędkościami wody, przedstawiają scenariusze dla hipotetycznych fal powodziowych o kulminacjach odpowiadających poziomom o prawdopodobieństwie przewyższenia 0,2% (niskie prawdopodobieństwo), 1% (średnie) oraz 10% (wysokie), wraz z opcją usunięcia obwałowań w przypadku prawdopodobieństwa 1%.

Właściwe odczytanie mapy jest kluczowe dla określenia poziomu zagrożenia powodziowego. Na pierwszym planie prezentowane są obszary zagrożenia powodziowego (OZP) i poligony klas głębokości:

- $h \leq 0,5$ m – oznacza niskie zagrożenie dla ludzi i obiektów budowlanych;
 - $0,5 \text{ m} < h \leq 2 \text{ m}$ – oznacza średnie zagrożenie dla ludzi ze względu na możliwość ewakuacji na wyższe piętra, ale wysokie ze względu na straty materialne;
 - $2 \text{ m} < h \leq 4 \text{ m}$ – wysokie zagrożenie dla ludzi; zalaniu mogą podlegać nie tylko partery, ale również pierwsze piętra budynków;
 - $h > 4 \text{ m}$ – wskazuje na bardzo wysokie zagrożenie dla ludzi i bardzo wysokie zagrożenie wystąpienia szkód całkowitych.
- Dodatkowym czynnikiem zwiększającym zagrożenie powodziowe jest prędkość wody, którą na mapach również przypisano do czterech klas:
- $v \leq 0,5$ m/s – prędkość mała: woda ma niewielką zdolność oddziaływania na obiekty;
 - $0,5 \text{ m/s} < v \leq 1 \text{ m/s}$ – prędkość średnia: woda ma umiarkowaną zdolność oddziaływania na obiekty i jest w stanie przemieszczać obiekty o niewielkich rozmiarach i masie, stanowi zagrożenie dla ludzi;
 - $1 \text{ m/s} < v \leq 2 \text{ m/s}$ – prędkość duża: woda ma silną zdolność oddziaływania na obiekty i jest w stanie przemieszczać obiekty o stosunkowo dużych rozmiarach i masie, stanowi poważne zagrożenie dla ludzi;
 - $v > 2 \text{ m/s}$ – prędkość bardzo duża: woda ma bardzo silną zdolność oddziaływania na obiekty i jest w stanie przemieszczać obiekty o bardzo dużych rozmiarach i masie, stanowi bardzo poważne zagrożenie dla ludzi.

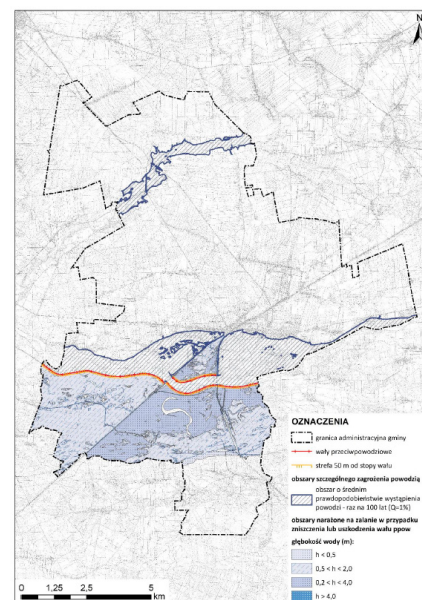


Mapa zagrożenia powodziowego m.st. Warszawy w sytuacji zniszczenia lub uszkodzenia wału przeciwpowodziowego podczas wystąpienia powodzi raz na 100 lat (1%). Źródło: Plan Zarządzania Kryzysowego miasta Warszawa.

czać obiekty o bardzo dużych rozmiarach i masie oraz naruszać strukturę obiektów statycznych, stanowi bardzo poważne zagrożenie dla ludzi.

W ogólnym rozumieniu, im większa jest głębokość wody i prędkość przepływu, z tym większym zagrożeniem powodziowym i stratami mamy do czynienia.

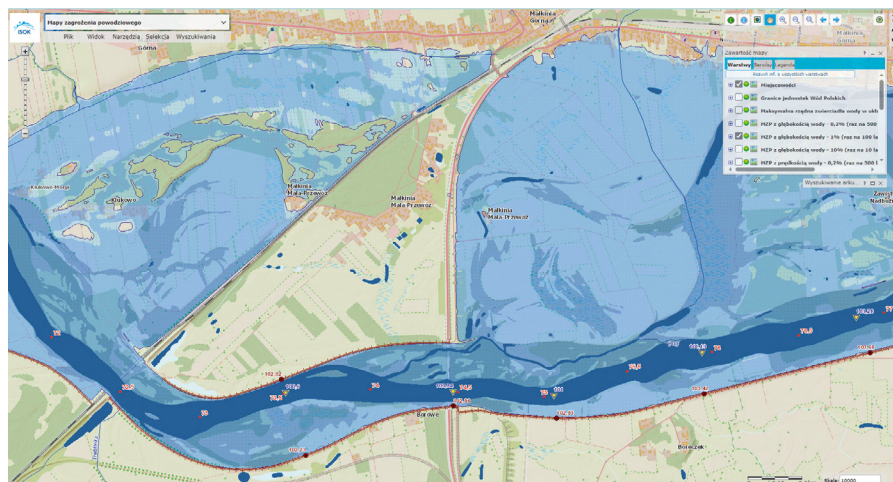
Reprezentacje zasięgów wody powodziowej dla każdego analizowanego scenariusza (obszary zagrożenia powodziowego) oraz poligony klas głębokości stanowią podstawę do utworzenia innych warstw zagrożenia powodziowego (np. miejsc przełań przez wały przeciwpowodziowe), a w dalszej kolejności warstw ryzyka powodziowego. Zgodnie z wytycznymi Dyrektywy Powodziowej, mapy zagrożenia powodziowego aktualizuje się co 6 lat, ale w razie potrzeby można to robić częściej. MZP opracowywane na potrzeby planistyczne to dokumenty urzędowe, które pokazują obszary narażone na powódź i potencjalne skutki jej wystąpienia. Są one niezbędne do planowania budownictwa, infrastruktury oraz działań związanych z zarządzaniem kryzysowym i ochroną ludności. Powinny być szeroko dystrybuowane, ponieważ zawierają informacje, które mogą przyczynić się do uratowania mienia i życia.



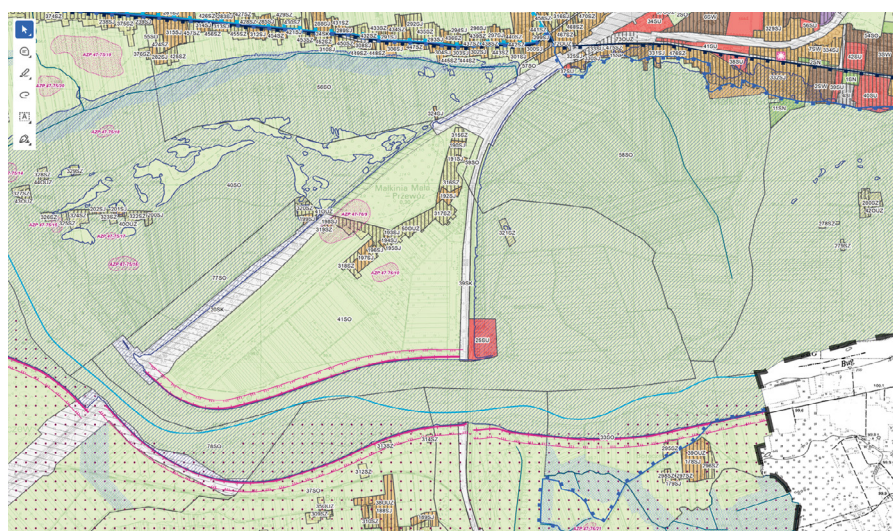
W gminie Małkinia Górna główne zagrożenie powodziowe stanowi rzeka Bug. Obowiązujące dla tego terenu mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego sporządziły Wody Polskie w uzgodnieniu z właściwymi wojewodami. Na obszarach szczególnego zagrożenia powodzią występują ograniczenia dla zagospodarowania terenu, które zgodnie z zapisami w ustawie Prawo Wodne wymagają uzgodnienia z Wodami Polskimi. Na obszarze szczególnego zagrożenia powodzią od rzeki Bug znajdują się głównie tereny niezabudowane, pojedyncze zabudowania zagrożone powodzią zlokalizowane są w kilku wsiach. Źródło: Prognoza oddziaływania na środowisko do Planu Ogólnego Gminy Małkinia Górna.

PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIA

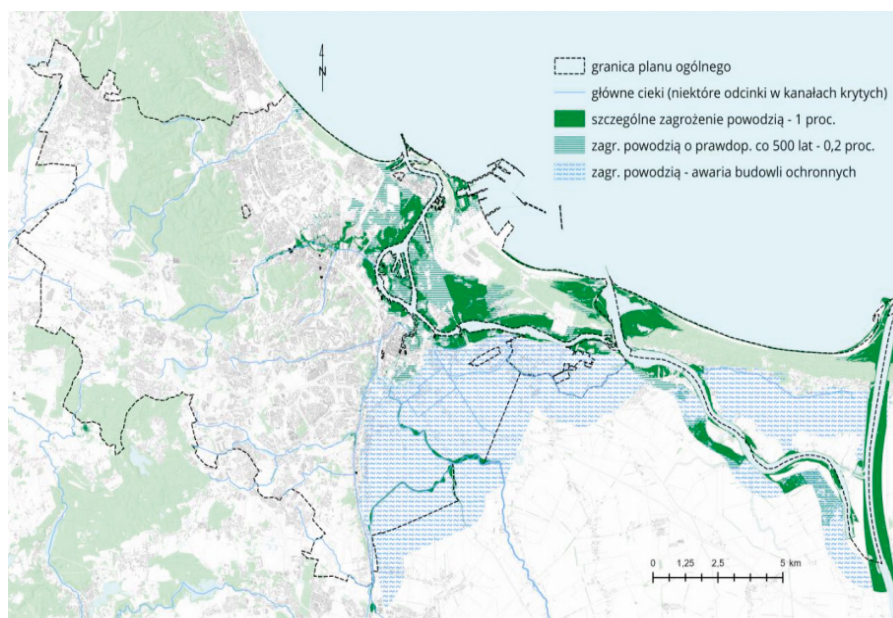
Mapy zagrożenia powodziowego uwzględniane są w Krajowym Planie Zarządzania Kryzysowego oraz wojewódzkich, powiatowych i gminnych planach zarządzania kryzysowego do identyfikacji powodzi jako jednego z występujących na danym terenie zagrożeń. Dokumenty te zawierają charakterystykę powodzi, ocenę ryzyka ich wystąpienia i potencjalne negatywne skutki dla społeczeństwa, środowiska, mienia i infrastruktury, a także obowiązki uczestników zarządzania kryzysowego oraz zestawienie sił i środków planowanych w sytuacjach kryzysowych. Dla prze-



Małkinia Górna – fragment obszarów szczególnego zagrożenia powodzią.
Źródło: Hydroportal – ISOK.



Plan ogólny gminy Małkinia Górna – fragment obszaru. Źródło: Cześć graficzna uzasadnienia planu ogólnego.



Zagrożenie powodziowe (od rzek oraz od strony morza) w granicach planu ogólnego gminy Gdańsk. Źródło: Opracowanie ekofizjograficzne podstawowe do planu ogólnego miasta Gdańska. Wskazane w opracowaniu obszary podlegają zakazom i ograniczeniom związanym z zabudową, zapisanym w ustawie Prawo wodne. Na terenach zagrożonych powodzią w wyniku awarii budowli ochronnych i jednocześnie użytkowanych rolniczo rekomenduje się zachowanie funkcji rolniczej poprzez włączenie tych terenów do strefy produkcji rolniczej lub strefy otwartej (obszary, które będą chronione przed rozwojem zabudowy: lasy, zieleń naturalna itp.).

ciwdziałania powodzi opracowywane są i wdrażane Plany Operacyjne Ochrony przed powodzią, które są załącznikami do niniejszych Planów Zarządzania Kryzysowego.

Inny przykład wykorzystania map zagrożenia powodziowego to, Plany ogólne gmin (Dz.U. 2003 nr 80 poz. 717). W trakcie ich tworzenia uwzględnia się uwarunkowania rozwoju przestrzennego gminy, w szczególności znajdujące się na terenie samorządu obszary szczególnego zagrożenia powodzią, wały przeciwpowodziowe oraz pasy o szerokości 50 m od stopy wału. Głównym celem ochrony przeciwpowodziowej w ramach Planów ogólnych gminy jest ograniczenie ryzyka powodziowego, poprzez unikanie wzrostu zagospodarowania obszarów szczególnego zagrożenia powodzią oraz określeniu warunków możliwego zagospodarowania pozostałych obszarów zagrożonych wystąpieniem powodzi.

Szerokie zastosowanie wyników modelowania hydraulicznego na potrzeby planistyczne pokazuje, jak ważne jest to narzędzie – zwłaszcza w dobie zmiany klimatu, która wpływa na intensywność i częstotliwość występowania powodzi. Mapy zagrożenia powodziowego – będące jednym z produktów modelowania – odnoszą się nie tylko do całego kraju, to również opracowania w skali bardzo lokalnej, ograniczonej nawet do jednej działki. Dlatego powinny stanowić źródło danych zarówno dla administracji państwowej i samorządowej, jak i każdego, kto mieszka na terenach zagrożonych powodzią lub rozważa zakup działki lub nieruchomości. ◀

F. Joshua Kettle | Unsplash







Satelitarna detekcja spiętrzeń lodowych – analiza zdarzenia z 2021 r.

Pomimo zachodzącej zmiany klimatu i systematycznego wzrostu średnich temperatur powietrza, zjawiska lodowe na rzekach Polski wciąż są odnotowywane i odgrywają znaczącą rolę w reżimie hydrologicznym. W skrajnych przypadkach mogą one prowadzić do tworzenia się zatorów, a nawet powodzi. W IMGW-PIB prowadzone są testy, których celem jest sprawdzenie możliwości wykorzystania zobrazowań satelitarnych do monitorowania i analiz rozwoju spiętrzeń form lodowych i tym samym zwiększenia naszego bezpieczeństwa.

Albert Malinger, Justyna Czarnecka, Magdalena Pawlak, Paweł Wilkosz, Wojciech Maćkowiak, Marta Bedryj | IMGW-PIB/Centrum Modelowania Powodziowego i Suszy w Poznaniu, Centrum Modelowania Powodziowego i Suszy w Gdyni, Biuro Modelowania Powodziowego i Suszy

Ostatnim okresem, gdy na głównych rzekach w Polsce występowały intensywne zjawiska lodowe był sezon zimowy 2020-2021. Szczególną uwagę zwraca odcinek Wisły powyżej zapory zbiornika Włocławek, który – zgodnie z dotychczas prowadzonymi obserwacjami oraz doniesieniami literaturowymi – należy uznać za najbardziej newralgiczny pod względem występowania zatorów lodowych w Polsce. W 2021 roku zjawiska lodowe obserwowano tam od połowy stycznia do

początku marca, przy czym znaczne ich nasilenie odnotowywano wraz z początkiem drugiego tygodnia lutego. Doszło wówczas – w wyniku podpiływu śryżu – do gwałtownego rozbudowania pokrywy lodowej powyżej zbiornika Włocławek, która 8 lutego spłynęła kilka kilometrów poniżej Płocka i zatrzymała się w okolicy Brwilna/Woli Brwileńskiej. Doprowadziło to do wytworzenia się spiętrzeń zgromadzonych form lodowych oraz znacznego zmniejszenia przekroju koryta, efektem

czego był gwałtowny wzrost stanów wody (9 lutego stan alarmowy na wodowskazie w Płocku przekroczony został o 1 m, a kolejnego dnia o 1,5 m). 10 lutego w godzinach popołudniowych, podczas dynamicznych wzrostów stanów wody wywołanych sytuacją lodową w okolicy Brwilna/Woli Brwileńskiej, doszło do ruszenia nagromadzonego lodu zlokalizowanego na odcinku powyżej Płocka. W okolicach Woli Brwileńskiej uformował się zator lodowy, któremu towarzyszyły spiętrze-



Widok w kierunku koryta głównego Wisły, okolice miejscowości Wola Brwileńska, 20.02.2021 r.



Widok w dół Wisły, okolice miejscowości Wola Brwileńska, w oddali widoczne lodolamcze, 21.02.2021 r.

nia lodu osiągające miejscami kilka metrów. Jeszcze do 11 lutego na wodowskazie Płock Brama Stoczni obserwowano wzrost stanów wody (stan alarmowy został przekroczony o ponad 2 m). W kolejnych dniach na wodowskazie w Płocku notowano systematyczne obniżanie stanów wody, które mogło być spowodowane wygładzaniem przez płynącą wodę dolnej warstwy pokrywy lodowej i zbu-

dowanego zatoru. Jednocześnie na skutek spływającego śryżu postępowała systematyczna rozbudowa pokrywy lodowej w górę rzeki – 15 lutego spiętrzenia i podbitki sięgały już okolic profilu wodowskazowego w Wyszogrodzie, utrzymując się na tym odcinku przez 9 dni. W związku z intensywną akcją lodołamania oraz ociepleniem, które nadeszło 20 lutego, w ostatnich dniach miesiąca

obserwowano fazę rozpadu lodu i stopniowe zanikanie zjawisk lodowych¹.

MISJE SATELITÓW SENTINEL

Europejska Agencja Kosmiczna opracowała i uruchomiła serię europejskich misji satelitów Sentinel na potrzeby programu Copernicus. Celem było stworzenie platformy zapewniającej nieodpłatny i otwarty dostęp do

¹ Szczegółowy opis przebiegu zlodzenia i genezę zatoru lodowego w okolicach Płocka przedstawiono w artykule „Zator na Wiśle w rejonie Płocka w lutym 2021 r.” autorstwa prof. Pawłowskiego i prof. Kolarskiego.



Widok w górę Wisły, okolice profilu wodowskazowego w Wyszogrodzie, 24.02.2021 r.

większości usług informacyjnych. Z punktu widzenia zagadnień dotyczących identyfikacji występowania zjawisk lodowych na rzekach, interesujących danych dostarczać mogą misje Sentinel-1 i Sentinel-2.

Satelity konstelacji Sentinel-1 prowadzą obserwacje radarowe w zakresie promieniowania mikrofalowego, dzięki czemu zobrażenia dostępne są niezależnie od pory dnia oraz warunków atmosferycznych. Głównym instrumentem pomiarowym jest radar z syntetyczną aperturą – C-SAR (ang. C-Band Synthetic Aperture Radar). Pozyskiwane dane, gromadzone z uwzględnieniem czterech trybów i trzech poziomów przetworzenia, umożliwiają użytkownikowi odpowiedni wybór rozdzielczości. Obecnie na orbicie operacyjnie funkcjonuje jeden satelita tej konstelacji, tj. Sentinel-1A (wyszlony w 2014 r.); Sentinel-1B (wyszlony w 2016 r.) po awarii zasilania w grudniu 2021 r. nie dostarcza już danych. 5 grudnia 2024 r. na orbitę wyniesiony został najnowszy satelita Sentinel-1C – po uzyskaniu pełnej gotowości do pracy okres rewizyty nad danym obszarem skróci się do 6 dni.

Z kolei satelity Sentinel-2 dostarczają wielospektralne zobrażenia powierzchni Ziemi w zakresie promieniowania widzialnego (VIS), czerwieni krawędziowej (RE) oraz bliskiej i średniej podczerwieni (NIR, SWIR), rejestrowane w 13 kanałach spektralnych za

pomocą skanera wielospektralnego – MSI (Multi-Spectral Instrument). Dane gromadzone są w trzech rozdzielczościach przestrzennych, w zależności od zarejestrowanego zakresu promieniowania elektromagnetycznego oraz dwóch poziomach przetworzenia. Obecnie na orbicie znajdują się trzy satelity tej konstelacji, tj. Sentinel-2A (wyszlony w 2015 r.), Sentinel-2B (wyszlony w 2017 r.) i Sentinel-2C (wyszlony w 2024 r.). Ten ostatni przejął zadania operacyjne Sentinela-2A, który zbliża się do końca swojego okresu eksploatacji. Funkcjonuje on jednak cały czas i wykonuje misję rozszerzoną, mającą na celu zwiększenie częstości rewizyty, która w przypadku dwóch satelitów wynosi 5 dni.

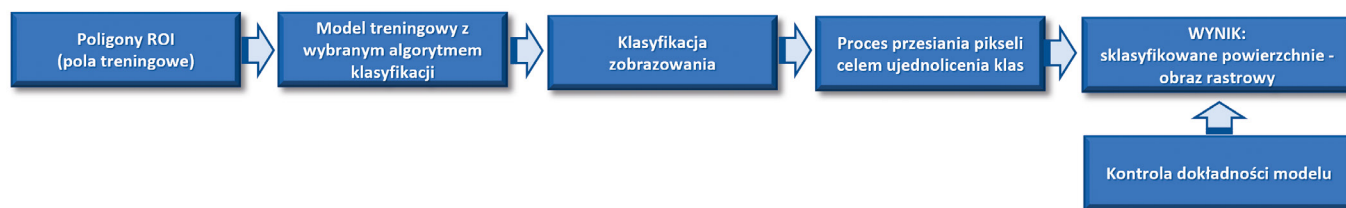
ANALIZY TESTOWE IDENTYFIKACJI SPIĘTRZEN LODOWYCH Z WYKORZYSTANIEM ZOBRAZOWAŃ SATELITARNYCH

W pierwszym etapie prac, które rozpoczęto w 2022 roku, podjęto próbę charakterystyki przebiegu zjawisk lodowych wraz z określeniem czasu ich trwania na odcinku Wisły powyżej zapory zbiornika Włocławek. Posiłowano się zarówno danymi obserwacyjnymi, jak również informacjami i dokumentacją fotograficzną wizji terenowych Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej, a także komunikatami publikowanymi przez Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie. Na podstawie wniosków wypracowanych po analizie

tych danych oraz spostrzeżeń z etapu budowy i testów eksperymentalnego modelu hydraulicznego uwzględniającego występowanie zjawisk lodowych, a także biorąc pod uwagę rejestrację zobrażeń misji Sentinel, ostatecznie do dalszych prac wybrano zobrażenia zarejestrowane 21 lutego 2021 roku – z godziny 4:59 w przypadku Sentinel-1 i z godziny 9:50 dla Sentinel-2.

ANALIZA ZOBRAZOWAŃ SENTINEL-2

Dzięki dobrej jakości danych optycznych Sentinel-2 (brak zachmurzenia w dniu obserwacji) i wybierając cztery kanały spektralne o rozdzielczości przestrzennej 10 m (B02 – blue, B03 – green, B04 – red, B08 – NIR) utworzono kompozycje w barwach naturalnych i CIR, które wykorzystano do wyznaczenia poligonów treningowych niezbędnych do przeprowadzenia klasyfikacji nadzorowanej w korycie Wisły. W celu jak najbardziej poprawnego wyznaczenia poligonów treningowych, oprócz kompozycji z Sentinel-2, wykorzystano wyniki uprzednio wykonanej klasyfikacji nienadzorowanej na podstawie tej samej sceny oraz dane pozyskane podczas prac terenowych PSHM (zdjęcia, filmy otrzymane z przelotu dronów). Testową klasyfikację form lodu wykonano trzema narzędziami dostępnymi w otwartym oprogramowaniu (Orfeo Tool-Box – OTB w QGIS, wtyczki Dzetsaka oraz Semi-Automatic Classification Plugin – SCP

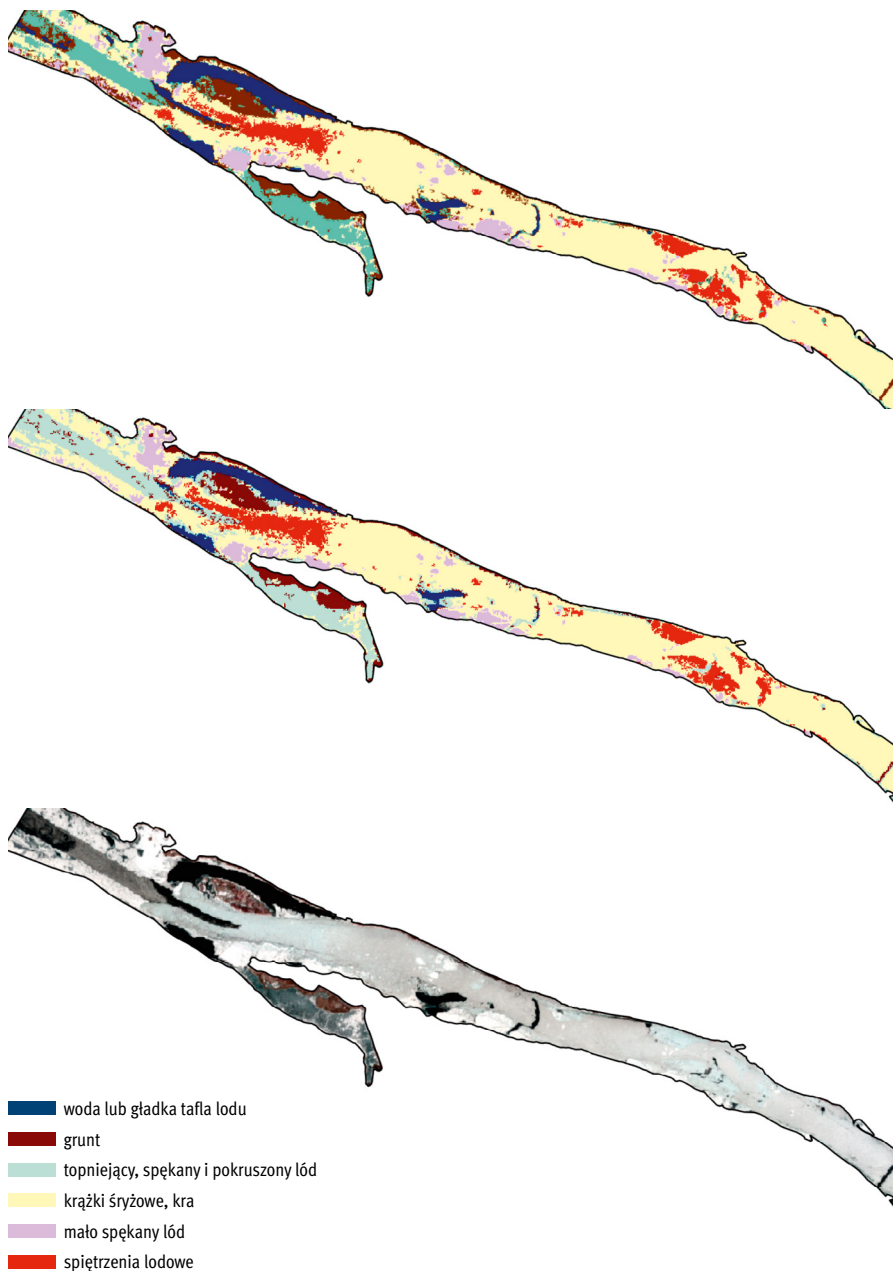


Schemat przedstawiający proces klasyfikacji sceny z Sentinel-2.

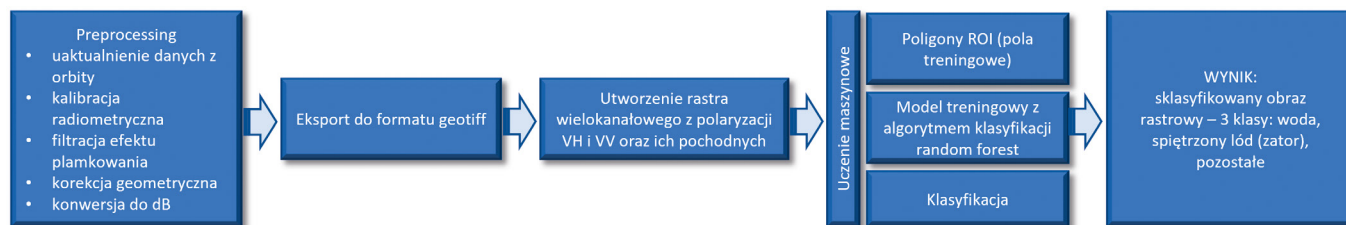
w QGIS). Tym sposobem zidentyfikowano i zdefiniowano klasy reprezentujące różne formy pokrycia terenu oraz zlodzenia, tj.: wodę lub gładką taflę lodu; grunt; topniejący, spękany, pokruszony lód; krążki śryżowe i krę; mało spękany lód częściowo pokryty śniegiem; spiętrzony lód, jako potencjalne miejsce zatoru.

Klasyfikację przeprowadzono testując kilka klasyfikatorów zaimplementowanych w narzędziach open source z uwzględnieniem różnych parametrów (Random Forest [RF]; Decision Tree [DT]; K-Nearest Neighbors [KNN]; Gaussian Mixture Model [GMM]; klasyfikator Bayesowski; Support Vector Machine [SVM] i Minimum Distance).

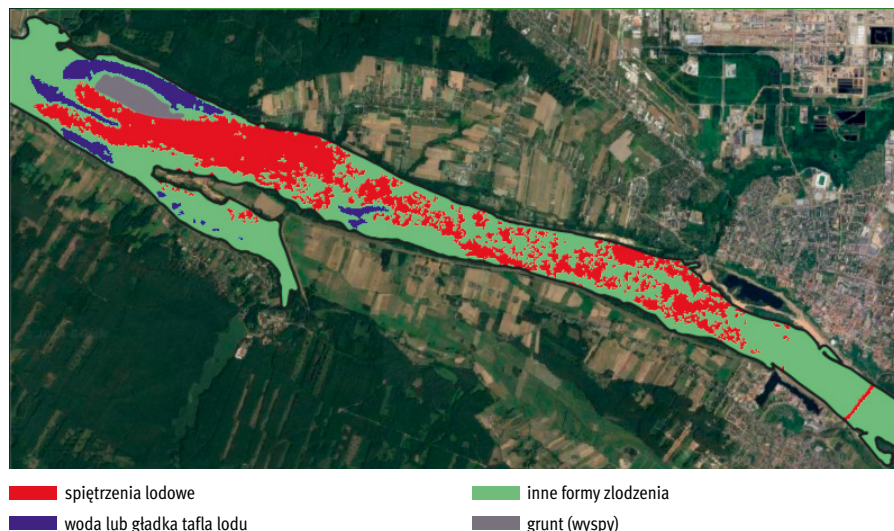
Do walidacji wykorzystano pięćset losowo wybranych punktów rozmieszczonych w korycie Wisły, znajdujących się poza polami treningowymi. Posłużyły one do oceny skuteczności wszystkich zastosowanych metod klasyfikacji. Obliczono następujące miary dokładności: całkowitą zgodność klasyfikacji (Overall Accuracy), współczynnik Kappa, dokładność klasyfikacji dla klasy spiętrzony lód (potencjalne miejsce zatoru), a także dla porównania z Kappą wskaźniki niezgodności: allocation disagreement, quantity disagreement oraz overall disagreement. Zastosowana procedura umożliwiła uzyskanie sklasyfikowanego obrazu rastrowego wraz z wyodrębnionymi klasami reprezentującymi: wodę lub gładką taflę lodu (kolor granatowy), grunt niepokryty formami zlodzenia (kolor brązowy), topniejący, spękany i pokruszony lód (kolor turkusowy), krążki śryżowe, kra (kolor jasno żółty), mało spękany lód (kolor różowy), spiętrzenia lodowe (kolor czerwony). Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że najlepsze rezultaty otrzymano po zastosowaniu klasyfikatora Random Forest (OTB, wtyczka Dzetsaka w QGIS). Zbliżone



Od góry kolejno: wizualizacja koryta Wisły 21.02.2021 r.; zobrazowanie Sentinel-2 (w kompozycji CIR color infra red); wyniki klasyfikacji Random Forest – OTB, Gaussian Mixture Model (GMM) – Dzetsaka.



Schemat przedstawiający kolejność procesów w analizie obrazów satelitarnych Sentinel-1.



Wynik przetworzenia zobrazenia na podstawie danych z satelity Sentinel-1 zarejestrowanych 21.02.2021 r.

wyniki klasyfikacji uzyskano także dla klasyfikatorów GMM i KNN (Dzetsaka).

ANALIZA ZOBRAZOWAŃ SENTINEL-1

W kolejnym etapie prac przeanalizowano zobrazenie z Sentinel-1, wykonane kilka godzin wcześniej. Wykorzystano dane geokodowanego, radarowego obrazu satelitarnego z poziomu 1 (ang. Ground Range Detected High resolution), które pozyskano w trybie radarowego, szerokiego pasa obrazowania (ang. Interferometric Wide Swath), rejestrowane w dwóch polaryzacjach VH i VV. Dane te poddano wstępnemu przetwarzaniu (preprocessingowi), obejmującemu uaktualnienie parametrów orbity, kalibrację radiometryczną, filtrację szumu plamkowego (speckle noise), korekcję geometryczną oraz konwersję wartości do jednostek logarytmicznych wyrażonych w decybelach (dB). Następnie przetworzone obrazy zostały wyeksportowane do formatu GeoTIFF, umożli-

wiającego dalszą analizę. Kolejnym krokiem było utworzenie rastra wielokanałowego, obejmującego m.in. dane z obu polaryzacji oraz ich pochodnych, stanowiącego podstawę do przeprowadzenia klasyfikacji.

Do zbudowania modelu klasyfikacyjnego wykorzystano metodę uczenia maszynowego. Na podstawie danych referencyjnych, w postaci poligonów ROI (ang. Region of Interest), zdefiniowano zbiór treningowy, który posłużył do nauki algorytmu klasyfikacyjnego. W przypadku zobrażeń z Sentinel-1 wydzielono trzy klasy: wodę; spiętrzony lód (jako potencjalne miejsce zatoru); pozostałe inne formy zlodzenia. Do klasyfikacji wykorzystano algorytm Random Forest. Proces klasyfikacji umożliwił przypisanie odpowiednich klas do pikseli w obrazie rastrowym, ze szczególnym uwzględnieniem obszarów występowania spiętrzonego lodu (potencjalnego miejsca zatoru).

W wyniku zastosowanej procedury otrzymano sklasyfikowany obraz rastrowy, pozwalający na wyodrębnienie klasy reprezentującej spiętrzenia lodowe, które na grafice wyróżniono kolorem czerwonym. W tym przypadku dodatkowo wyodrębniono klasę reprezentującą inne formy zlodzenia, m.in. takie jak krążki śryżowe i krę (kolor jasno zielony), a także klasę reprezentującą wodę lub gładką taflę lodu (kolor niebieski). W przypadku klasyfikacji danych pozyskanych z Sentinel-1 nie klasyfikowano gruntu – wysp (kolor szary). W lewym, górnym rogu wizualizacji dostrzec można kształt rynny utworzonej na skutek pracy lodołamaczy.

Głównym celem przeprowadzonych analiz obrazów Sentinel-1 i 2 było określenie lokalizacji spiętrzeń lodu, istotnych z punktu widzenia budowy i testów eksperymentalnego modelu hydraulicznego uwzględniającego występowanie zjawisk lodowych. Przy użyciu dostępnych narzędzi i algorytmów testowano różne metody klasyfikacji. W przypadku zobrażeń optycznych możliwe było wydzielenie kilku klas dla różnych form lodu, natomiast w odniesieniu do danych radarowych ostatecznie skupiono się przede wszystkim na jak najbardziej dokładnym określeniu lokalizacji spiętrzonego lodu. Wstępne wyniki przeprowadzonej próby uznano za obiecujące, wskazując jednocześnie potrzebę prowadzenia szerszych badań, z uwzględnieniem szczegółowej analizy przebiegu zjawisk lodowych. Odpowiednio przetworzone zobrażenia satelitarne mogłyby stanowić istotne uzupełnienie klasycznych obserwacji i jednocześnie wspierać procesy podejmowania decyzji. ◀

Teledetekcja oraz GISw monitoringu wałów przeciwpowodziowych

IMGW-PIB znany jest przede wszystkim z prognozowania pogody i monitoringu stanu rzek. Nieduża część społeczeństwa zdaje sobie sprawę, że poza tymi najbardziej oczywistymi kwestiami zajmujemy się szeregiem innych problemów – nieco mniej medialnych i nośnych, jednak z perspektywy bezpieczeństwa – niezwykle ważnych. Mowa o monitorowaniu stanu wałów przeciwpowodziowych. Zanim nastąpi kataklizm, na pierwszej linii obrony przed powodzią są wały. I to właśnie od tych budowli, ich stanu i wytrzymałości, zależy los wielu ludzi.

Dagmara Zelaya-Wziątek, Maciej Kuzioka, Tomasz Ryfa, Maciej Wrzesiński | IMGW-PIB/Centrum Technicznej Kontroli Zapór



Instytut zajmuje się tą kwestią w sposób całościowy – monitorujemy nie tylko pogodę i stan rzek, ostrzegając tym samym społeczeństwo przed możliwością wystąpienia niebezpieczeństwa, tworzymy mapy zagrożenia powodziowego i prognozy powodziowe, żeby uświadomić o skali potencjalnego problemu, ale również monitorujemy stan

wałów przeciwpowodziowych, aby pomóc zapewnić najwyższy stopień zabezpieczenia przed ewentualnymi skutkami powodzi. Problematyką tą zajmuje się w IMGW-PIB Centrum Technicznej Kontroli Zapór (CTKZ) – jednostka, która zgodnie z prawem wodnym pełni rolę Państwowej Służby do Spraw Bezpieczeństwa Budowli Piętrzących.

Pod naszą opieką jest większość wałów przeciwpowodziowych I i II klasy znajdujących się w Polsce. Co roku wykonujemy oceny stanu technicznego i stanu bezpieczeństwa budowli piętrzących, w tym również wałów. Sam proces przygotowania oceny jest złożony i bazuje na kompleksowych pomiarach geodezyjnych i teledetekcyjnych oraz bada-



Lokalizacja badanych wałów.

niach geotechnicznych, geofizycznych, betonów i wizji lokalnej.

Wał przeciwpowodziowy można porównać do organizmu, który zaraz po swoim powstaniu jest silny i zdrowy, a każda jego część sprawnie spełnia swoją funkcję. Jednak zachodzące z czasem procesy erozyjne powodują, że konstrukcja – tak samo jak organizm – staje się słaba i wymaga interwencji specjalisty. I w tym miejscu właśnie pojawia się my – eksperci analizujący wnikliwie przyczynę choroby (działające mechanizmy erozyjne) oraz miejsce i rozmiar jej występowania. Pierwszym z etapów diagnozowania problemu, podobnie jak w medycynie, jest badanie „internistyczne” – nieinwazyjna ocena stanu powierzchni wału. W tym kontekście przychodzi z pomocą teledetekcja, a mówiąc dokładniej skaning laserowy oraz kamery lotnicze, które w sposób bezinwazyjny obrazują zmiany powierzchniowe będące przyczyną lub skutkiem toczącej się erozji. Dopiero po wstępnej ocenie tych oczywistych oznak słabości i po ustaleniu dokładnych miejsc ich występowania przystępujemy do szczegółowych badań wnętrza wału wykonując badania geofizyczne i geotechniczne.

TELEDETEKCYJA LOTNICZA: SAMOLOTY I DRONY JAKO PIERWSZA LINIA MONITORINGU

Planowanie monitoringu środowiska zaczyna się od podstawowego pytania: jaką metodą pomiarową zastosować? W przypadku wałów przeciwpowodziowych, których struktura i układ przestrzenny są dość przewidywalne, samo zebranie danych nie stanowi wyzwania pod względem technicznym. Problem pojawia się jednak w praktyce. Wały są długimi obiektami liniowymi, często porośniętymi gęstą roślinnością. Zarówno bujna roślinność, jak i znaczny rozkład przestrzenny obwałowań skutecznie utrudnia, a miejscami wręcz uniemożliwia bezpośrednie pomiary ich geometrii.

Co roku CTKZ ocenia stan techniczny blisko 700 kilometrów obwałowań. Przy tak dużej skali działania konieczne są rozwiązania łączące wysoką dokładność z wydajnością. Pod tym względem za najefektywniejszą metodę pomiaru uznaje się dziś skaning laserowy (LiDAR). Technologia ta umożliwia zebranie w krótkim czasie bardzo gęstego pomiaru, którego efektem jest chmura punktów zawierająca nawet kilkaset pomiarów na metr kwadratowy. Dzięki tej właściwości otrzymujemy

jednorodny i szczegółowy obraz terenu. Co więcej, skaning laserowy zapewnia rejestrację kilku odbić pojedynczej wiązki laserowej, co pozwala odróżnić roślinność od rzeczywistej powierzchni gruntu. Po odpowiednim przefiltrowaniu danych uzyskujemy precyzyjny model rzeźby samego terenu wolnego od roślinności i pozostałych zakłóceń.

Równie istotny jak metoda pomiarowa jest wybór nośnika, czyli platformy, z której wykonywane są pomiary. Od lat niezastąpione okazują się statki powietrzne – bezzałogowe statki powietrzne (drony) i samoloty załogowe wysokiego pułapu lotu. Ich największymi atutami są szybkość działania, wysoka dokładność oraz fakt, że nie wymagają wchodzenia w często trudno dostępny, a nawet niebezpieczny teren. W CTKZ rozpoczęliśmy przygodę ze skanowaniem z pułapu lotniczego w 2015 roku. Na początku stawialiśmy na drony – zarówno wielowirnikowce, jak i płatowce. Zaletą wykonywania pomiarów tą techniką jest dokładność danych, ale przede wszystkim duża mobilność metody i krótki czas przygotowania do samego pomiaru. Dzięki tym właściwościom możliwe jest szybkie uzyskanie aktualnych informacji o stanie badanego obszaru. Jednak w sytuacji, gdy obszar pomiarowy obejmuje 700 kilometrów, kluczowe znaczenie zyskuje prędkość wykonania skaningu. W takich warunkach optymalnym rozwiązaniem okazuje się pomiar z pokładu samolotu – metoda, która łączy dużą wydajność z satysfakcjonującą dokładnością. To właśnie skaning laserowy z tej platformy pomiarowej stanowi obecnie podstawę badań i monitoringu wałów przeciwpowodziowych w CTKZ. Z kolei drony, ze względu na swoją wyjątkową precyzję i elastyczność operacyjną, wykorzystujemy przede wszystkim do pomiarów mniejszych obiektów, gdzie liczy się dokładność co do milimetra. W takich przypadkach wysoka rozdzielczość danych jest wręcz na wagę złota.

NUMERYCZNE MODELE TERENU – KLUCZ DO WYKRYWANIA USZKODZEŃ

Po uzyskaniu i przefiltrowaniu danych do formy odwzorowującej geometrię wału przeciwpowodziowego, tworzony jest Numeryczny Model Terenu (NMT). Na tym etapie wał zostaje niejako „zamknięty” w cyfrowej formie, co umożliwia szczegółową identyfikację jego niedoskonałości i potencjalnych uszkodzeń. Wyniki analiz przesyłane są następnie do zarządcy obiektu.

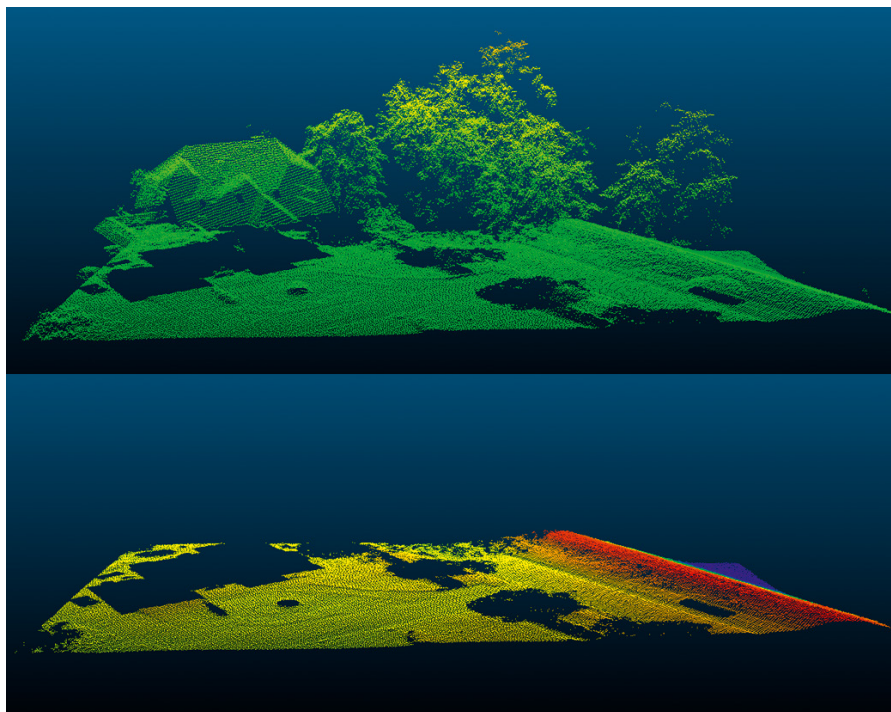
Na ich podstawie przygotowuje się plany modernizacji obiektu lub działania mające na celu likwidację pojedynczych uszkodzeń. Zdarza się, że usunięcie lokalnego uszkodzenia wystarczy do przywrócenia bezpieczeństwa budowli. Często jednak do zabezpieczenia struktury wału nie wystarczy przyklejenie przysłowiowego plasterka. Wówczas pożądanym tokiem działań jest usunięcie przyczyny problemu. Dlatego też podczas analizy NMT staramy się nie tylko identyfikować uszkodzenia, ale także określić ich możliwe źródło.

Uszkodzenia dzielimy na dwie główne kategorie: te wynikające z działań sił zewnętrznych (np. lokalne obniżenia skarp w postaci ścieżek wykonanych przez ludzi lub zwierzęta, koleiny na koronie wału) oraz takie, które mogą świadczyć o wewnętrznych procesach erozyjnych, jak osuwiska czy osiadanie gruntu. Szczególną kategorię awarii wykrywanych podczas analiz przestrzennych stanowią uszkodzenia odzwiercące, takie jak nory i jamy. Na modelu NMT widoczne są one jako niewielkie, ale głębokie wgłębienia. Mimo pozornie niedużych zmian powierzchniowych, ich przebieg może być złożony i sięgać głęboko w strukturę wału, stanowiąc tym samym poważne zagrożenie dla jego stabilności. Powstaje więc zasadnicze pytanie – według jakich kryteriów identyfikowane są uszkodzenia?

Za potencjalne uszkodzenie wykryte na podstawie NMT uznajemy każdą nieciągłość powierzchni wału nienawiazującą do jego pierwotnego kształtu. Na tym etapie wszelkie zidentyfikowane zaburzenia nazywamy anomaliami. W dalszej kolejności weryfikujemy czy wykryte anomalie nie są przypadkowym efektem nadmiernej generalizacji modelu (np. wynikającej przez odfiltrowanie punktów należących do roślinności) lub celowo wprowadzonymi zmianami inżynierskimi. W tym procesie niezwykle pomocna jest ortofotomapa pozyskiwana równolegle ze skanowaniem laserowym, która poprzez zestawienie danych geometrycznych z rzeczywistym wyglądem terenu pozwala lepiej zrozumieć kontekst obserwowanych zjawisk. Jeśli dana anomalia nie znajduje racjonalnego uzasadnienia, klasyfikujemy ją jako uszkodzenie. Dopiero wtedy – na podstawie jej kształtu, lokalizacji i kontekstu terenowego – można próbować przypisać jej konkretną nazwę jako osuwisko, ścieżka zwierzęca, dzikie przejście, norę itp.



Chmura punktów w barwach widzialnych (RGB).



Chmura punktów (górne zdjęcie); punkty reprezentujące grunt do utworzenia NMT (dolne zdjęcie).

Aby zobrazować złożoność tego procesu, przyjrzyjmy się przykładowi osuwiska. Charakteryzuje się ono linijnym przebiegiem, często poprzedzonym widoczną szczeliną w górnej części, stopniowym obniżeniem terenu w strefie środkowej oraz nagromadzeniem przemieszczonego materiału u podnóża. Wszystkie te cechy mogą, ale nie muszą, występować jednocześnie. To sprawia, że pełna automatyzacja procesu identyfika-

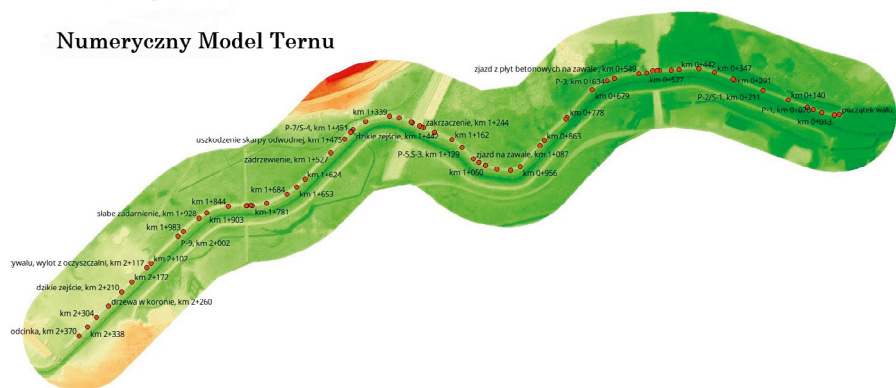
cji uszkodzeń na podstawie NMT pozostaje dużym wyzwaniem, a weryfikacja jej końcowych wyników przez specjalistów dobrze znających uwarunkowania terenowe jest absolutnie niezbędna.

Od tego roku w ramach rozszerzenia metod identyfikacji uszkodzeń planujemy użycie dodatkowego narzędzia – analizy obrazowań w bliskiej podczerwieni, a konkretnie analizę

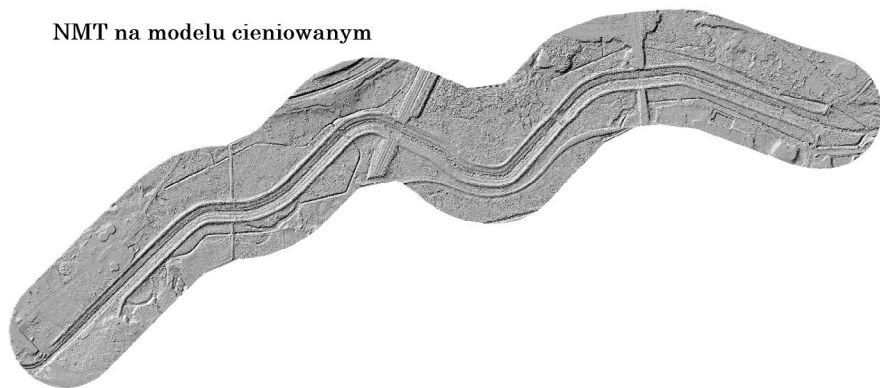
Ortofotomapa



Numeryczny Model Terenu



NMT na modelu cieniowanym



Wizualizacja produktów teledetekcyjnych opracowywanych w CTKZ.



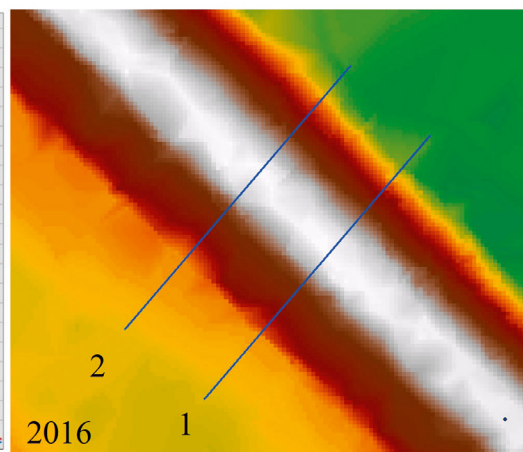
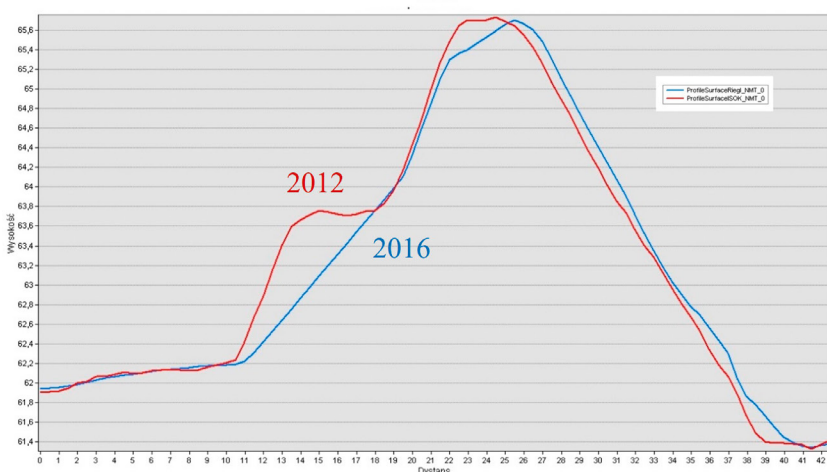
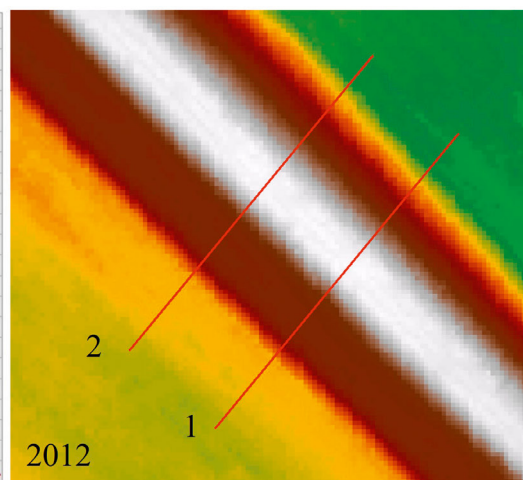
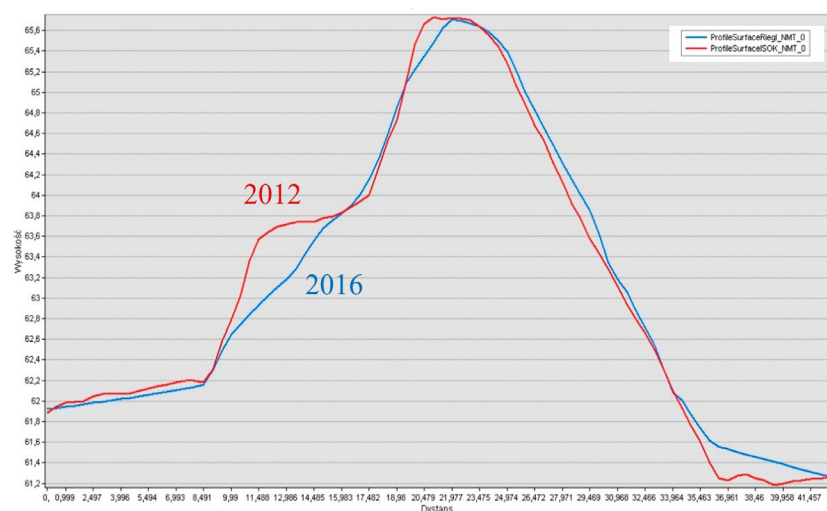
Uszkodzenie wału widoczne na NMT i ortofotomapie.

znormalizowanego różnicowego wskaźnika wegetacji (NDVI). Często uszkodzeniom, szczególnie o charakterze powierzchniowym, towarzyszy odarnienie co sprawia, że zmienność wartości NDVI może stanowić cenne uzupełnienie dotychczasowych metod wykrywania uszkodzeń.

DŁUGOOKRESOWY MONITORING STANU WAŁÓW – PREWENCJA PRZED KATAKLIZMEM

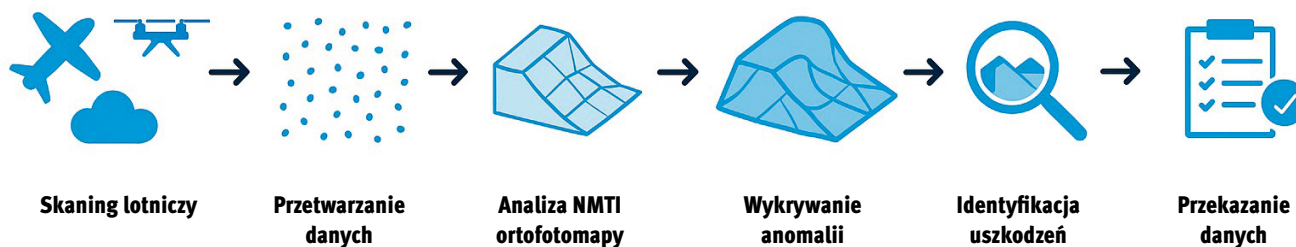
Analiza stanu obecnego, czyli identyfikacja uszkodzeń występujących na badanym wale, to dopiero pierwszy etap prowadzonej przez nas obserwacji. Zgodnie z prawem wodnym, każdy wał przeciwpowodziowy powinien być kontrolowany pod względem bezpieczeństwa co pięć lat. Z taką właśnie częstotliwością prowadzimy nasze pomiary na poszczególnych odcinkach. Obecnie, po ponad dziesięciu latach wykorzystania skaningu lotniczego, dysponujemy co najmniej dwoma zestawami danych dla każdego wału.

Dzięki pozyskiwaniu danych w ujęciu długoterminowym oceniamy już nie tylko stan aktualny, ale także monitorujemy dynamikę zmian w czasie – ich tempa, kierunku oraz stopnia zaawansowania. Takie podejście pozwala z kolei lepiej zrozumieć i rozpoznać zachodzące procesy erozyjne. Podstawą tych analiz są tzw. modele różnicowe, czyli modele wykazujące różnice wysokościowe wału powstałe między dwoma okresami badawczymi. Proces identyfikacji uszkodzeń przebiega analogicznie, jak w przypadku analizy Numerycznego Modelu Terenu, jednak jego efektem nie jest już tylko identyfikacja i lokalizacja ubytków, lecz także ocena ich rozwoju w czasie. Zdarza się, że niektóre z uszkodzeń wykrytych na postawia analizy danych z pojedynczej kampanii pomiarowej są uszkodzeniami nieaktywnymi – to znaczy, że w ciągu pięciu lat nie uległy pogorszeniu. Takie ubytki obniżają ogólny poziom bezpieczeństwa, ale nie w sposób krytyczny. Inaczej wygląda sytuacja w przypadku uszkodzeń o wysokiej dynamice rozwoju, co świadczy o intensywnie zachodzącym procesie erozji wewnętrznej, który realnie zagraża integralności konstrukcji wału. Uszkodzenia tego rodzaju powinny zostać jak najszybciej usunięte, a ich przyczyna zatrzymana. Informacje te są kluczowe przy planowaniu modernizacji i ustalaniu priorytetów dla prac naprawczych.



Identyfikacja uszkodzenia na profilu poprzecznym obwałowania z danych wieloczasowych.

PROCES MONITORINGU WAŁU



Monitoring stanu wałów przeciwpowodziowych to przykład tego, jak wiedza i technologia mogą pracować na rzecz bezpieczeństwa – systematycznie, bez rozgłosu, ale z realnym wpływem na funkcjonowanie infrastruktury krytycznej. Właśnie tu swoją kluczową rolę odgrywa Centrum Technicznej

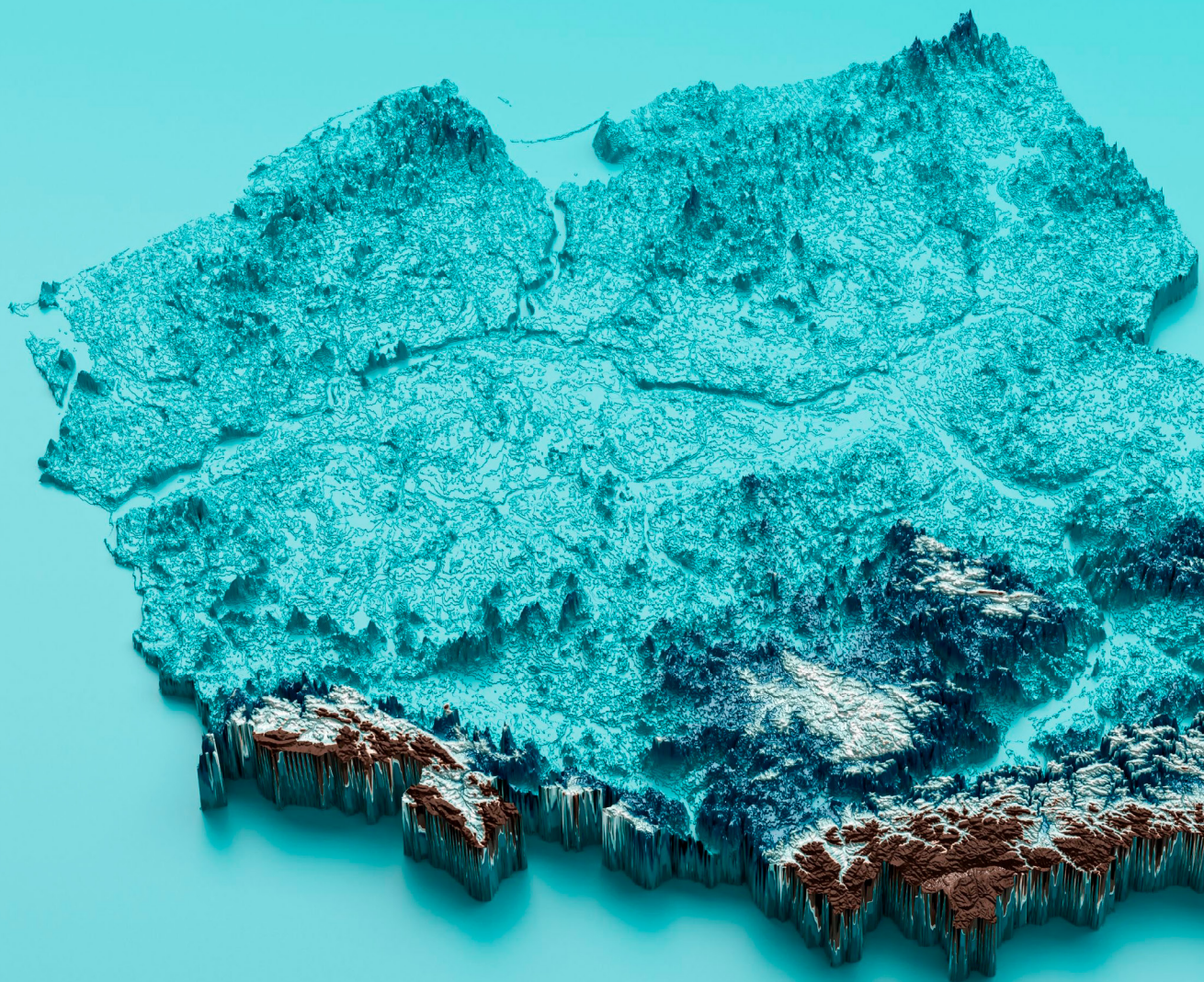
Kontroli Zapór IMGW-PIB, zespół który łączy doświadczenie inżynierskie z nowoczesnymi metodami obserwacji przestrzennych. W CTKZ wiemy, że skuteczna ochrona zaczyna się na długo przed pierwszą kroplą deszczu. Dlatego nieustannie rozwijamy metody analizy danych przestrzennych, by zawczasu

wykrywać słabe punkty i ograniczać ryzyko katastrofy. Bo choć samych zjawisk ekstremalnych nie da się całkowicie uniknąć, to ich skutki możemy, a nawet powinniśmy minimalizować. Teledetekcja już dziś odgrywa w tym procesie kluczową rolę, a jej znaczenie w najbliższych latach będzie tylko rość. ◀

Wiedza zakodowana w kolorze – zobaczyć to, co ukryte

„Jeden obraz jest wart więcej niż tysiąc słów” – to stare chińskie powiedzenie bywa często przywoływane w kontekście systemów informacji przestrzennej (GIS). Podobną myśl wyraził Napoleon Bonaparte, stwierdzając, że „dobry szkic jest lepszy niż długa mowa”. W IMGW-PIB wiemy, że z dobrze opracowanej mapy da się czytać niczym z wartościowej książki.

Radosław Doktor, Grzegorz Jendrzej, Barbara Kossakowska-Banacka, Marcin Wilamowski | IMGW-PIB/Centrum Hydrologicznej Oslony Kraju, Biuro Modelowanie Powodziowego i Suszy



Temperatura powietrza, opady atmosferyczne, zachmurzenie, zobrażenia radarów meteorologicznych, stany i przepływy wód na wodowskazach itd., to tylko część elementów meteorologicznych i hydrologicznych wizualizowanych w ramach Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej. Materiały te są udostępniane społeczeństwu, instytucjom publicznym i branżowym za pośrednictwem serwisów mapowym Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego.

Aby stworzyć takie mapy, konieczne jest wcześniejsze pozyskanie i przetworzenie dużej ilości danych przestrzennych. Za ich

przygotowanie odpowiada zwykle kilkuosobowy zespół. To właśnie jego członkowie opracowują tematyczne warstwy danych, które stanowią merytoryczną podstawę map. Od etapu zbierania danych, przez analizy przestrzenne, po graficzne opracowanie i archiwizację – codziennie powstają kolejne gigabajty informacji.

Dobrze zaprojektowany serwis mapowy nie tylko ułatwia szybkie dotarcie do istotnych informacji, ale także pozwala zrozumieć przestrzenne zależności między zjawiskami. W IMGW-PIB od wielu lat wykorzystujemy w tym celu narzędzia firmy ESRI. Program ArcGIS, wraz z jego kolejnymi wersjami i aktualizacjami, od kilkunastu lat wspiera pracowników w analizach przestrzennych. Od niedawna Instytut korzysta także z innych nowoczesnych rozwiązań ESRI – platformy Enterprise, która umożliwia efektywne przechowywanie danych oraz publikowanie zaawansowanych serwisów mapowych.

PREZENTACJA OPROGRAMOWANIA

ArcGIS Enterprise to kompleksowa platforma informatyczna stworzona przez firmę ESRI do realizacji zróżnicowanych zadań geoprzestrzennych, zaczynając od przechowywania zcentralizowanych i uporządkowanych baz danych, poprzez wykonywanie skomplikowanych analiz i automatyzację procesów, po nowoczesne wizualizacje i ich publikacje. Platforma daje możliwość integracji różnych systemów, automatyzacji zadań oraz

pozwała na równoległą pracę kilku użytkowników na tych samych zbiorach danych. Co więcej, w organizacjach takich jak IMGW-PIB, Enterprise służy jako narzędzie do administrowania licencjami i użytkownikami oraz do zarządzania udostępnianą treścią.

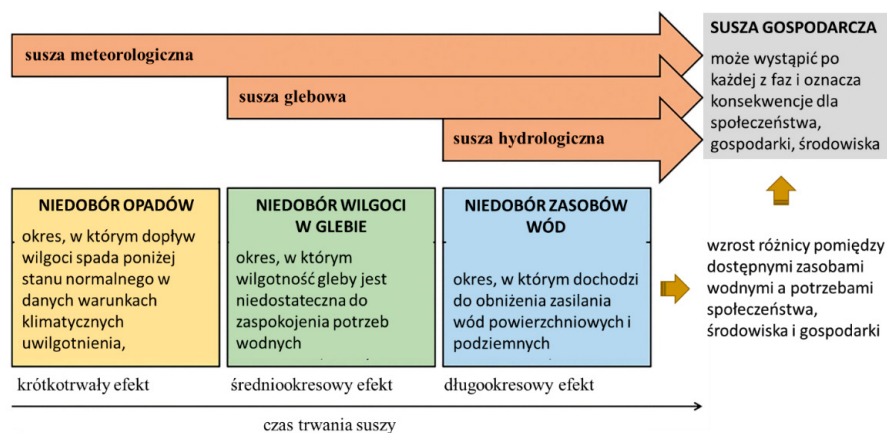
Podstawowe funkcjonalności platformy wykorzystywane w IMGW-PIB:

- Zarządzanie danymi – duże zbiory danych obejmujące całą Polskę, jak Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10K) czy Państwowy Rejestr Granic (PRG), stanowiące warstwy referencyjne przechowywane na serwerze Enterprise, są łatwo dostępne dla użytkowników wewnętrznych z poziomu ArcGIS.
- Niestandardowe wizualizacje – dashboards, story maps czy web experience to nowoczesne i atrakcyjne sposoby przedstawiania danych. Dynamiczna forma i atrakcyjna szata graficzna sprawiają, że publikowane treści są łatwiejsze do analizy przez odbiorców.
- Udostępnianie serwisów mapowych – portal Enterprise umożliwia publikację treści zarówno w publicznej domenie, tak aby były dostępne dla całego społeczeństwa, jak i wewnątrz organizacji. Obie te funkcjonalności będą wykorzystywane w Instytucie, gdyż ułatwiają komunikację wewnętrzną i usprawniają obowiązek informacyjny.
- Możliwość automatyzacji procesów dzięki ArcGIS Notebook Server.

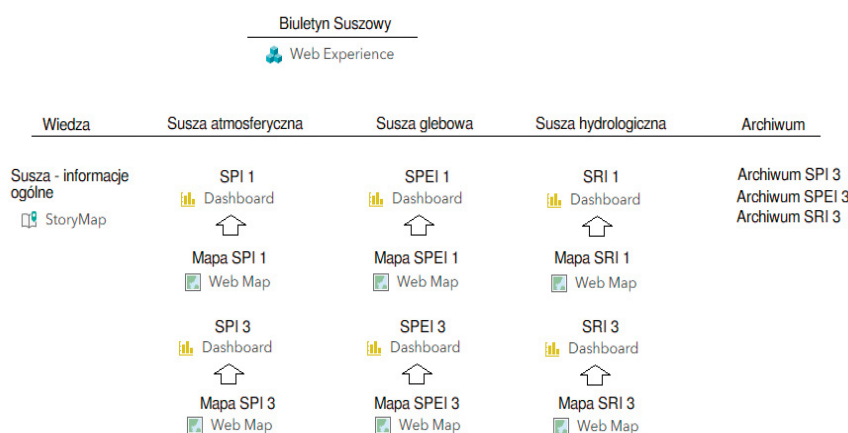
Platformę można dowolnie rozbudowywać o dodatkowe komponenty (serwery) w za-



Architektura platformy Enterprise, Źródło: ESRI.



Fazy rozwoju suszy. Źródło: Szalińska W., Tokarczyk T., 2022, Susza: przyczyny, propagacja i konsekwencje, Część 1 i 2, Gospodarka Wodna, 10.15199/22.2022.4.1/10.15199/22.2022.5.2.



Schemat strony Web Experience (do aktualizacji po zakończonych pracach nad biuletem).

leżności od indywidualnych potrzeb. Istnieje szeroki wachlarz takich komponentów, zaczynając od wyboru systemu operacyjnego Windows/Linuks, poprzez rozwiązania chmurowe lub na własnej infrastrukturze, obsługę wielu rodzajów baz danych oraz dołączenie wielu rodzajów serwerów obsługujących odpowiednie dane.

BIULETYN SUSZOWY – NOWE SPOJRZENIE

Przykładem zastosowania możliwości platformy ArcGIS Enterprise w zakresie wizualizacji danych jest interaktywny biuletyn podsumowujący warunki suszowe w Polsce. Jego nowatorska forma, oparta na dynamicznych mapach, ułatwia analizę przebiegu suszy w ujęciu półrocznym – w okresie chłodnym (od listopada do kwietnia) oraz ciepłym (od maja do października).

Susza definiowana jako zjawisko naturalne, spowodowane przez długotrwały brak lub niedobór opadów atmosferycznych, wpływa na wszystkie elementy obiegu wody. Pierwsza faza suszy – susza atmosferyczna – wynika ze zmniejszonych w danym okresie opadów. Jeśli okres ten jest długotrwały i dodatkowo wstępują wysokie temperatury powodujące zwiększone parowanie, dochodzi do przesuszenia kolejnych warstw gleby. Pojawiają się niedobory wody dla roślin. Tą fazę nazywa się suszą glebową. W przypadku dalszego utrzymywania się stanu niedoboru opadów, gdy zasoby wód podziemnych nie są uzupełniane wodami opadowymi, następuje obniżanie się zwierciadła wód podziemnych i obniżenie stanów wód powierzchniowych, co prowadzi do kolejnego etapu, jakim jest susza hydrologiczna. Każda faza rozwoju suszy – meteorologiczna, glebowa i hydrologiczna – może przynieść określone

straty społeczne, środowiskowe oraz gospodarcze, wywołując tzw. suszę gospodarczą.

Do wizualizacji powyższych trzech faz suszy wykorzystano trzy wskaźniki standaryzowane:

- SPI (Standardized Precipitation Index) – wskaźnik opadu standaryzowanego. Odzwierciedla zestandaryzowany stopień odchylenia sumy opadów w określonym przedziale czasowym w stosunku do normy wieloletniej.
- SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) – wskaźnik standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego. Odzwierciedla zestandaryzowany stopień odchylenia klimatycznego bilansu wodnego w stosunku do normy wieloletniej.
- SRI (Standardized Runoff Index) – zestandaryzowany stopień odchylenia mediany odpływów ze zlewni w określonym przedziale czasowym w stosunku do normy wieloletniej.

Wszystkie wskaźniki wyliczono z krokiem miesięcznym i trzymiesięcznym, przy zastosowaniu jednakowego okresu referencyjnego 1981-2020. Wskaźniki te najczęściej przyjmują wartości w zakresie od 2,5 do -2,5. Wartości dodatnie oznaczają warunki wilgotne, ujemne – sprzyjające występowaniu suszy. Stan normalny definiowany jest jako zakres od -1 do 1.

STRUKTURA BIULETYNU

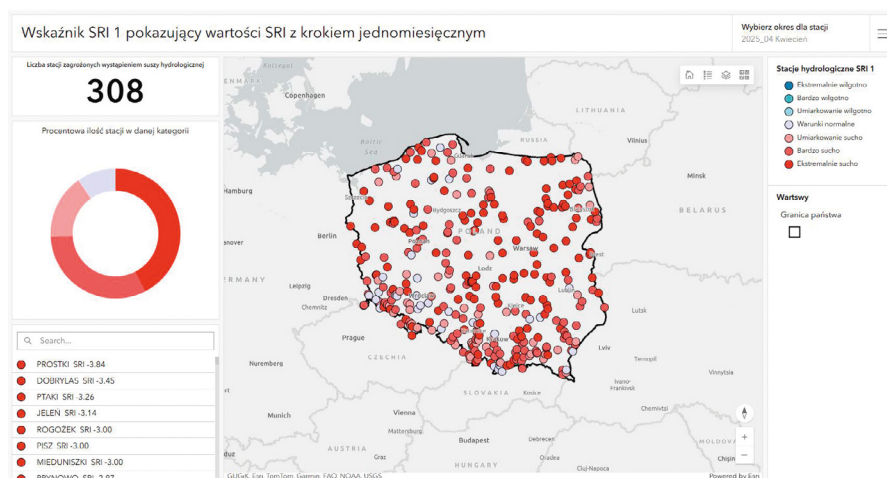
Do wizualizacji biuletynu suszowego wykorzystano kilka aplikacji dostępnych w ramach platformy Enterprise. Cała struktura opiera się o Web Experience, w której zgnieźdzone są kolejne aplikacje i funkcjonalności. Web Experience to zbudowana w narzędziu Experience Builder strona internetowa prezentująca dane przestrzenne publikowane w postaci interaktywnych map, dashboardów, story maps. Do konfiguracji tych aplikacji nie jest potrzebna znajomość programowania czy budowy stron internetowych – wszystkie ustawienia treści, wyglądu i funkcjonalności odbywają się poprzez okna dialogowe.

W opracowanym biulecie suszowym zaprojektowano kilka podstron, zakładów. W pierwszej zakładce "Wiedza" wykorzystano Story Map – aplikację pozwalającą budować cyfrową narrację, ilustrowaną zdjęciami i wykresami. Wraz z przewijaniem tekstu po lewej stronie okna, po prawej pojawiają się odpowiednie

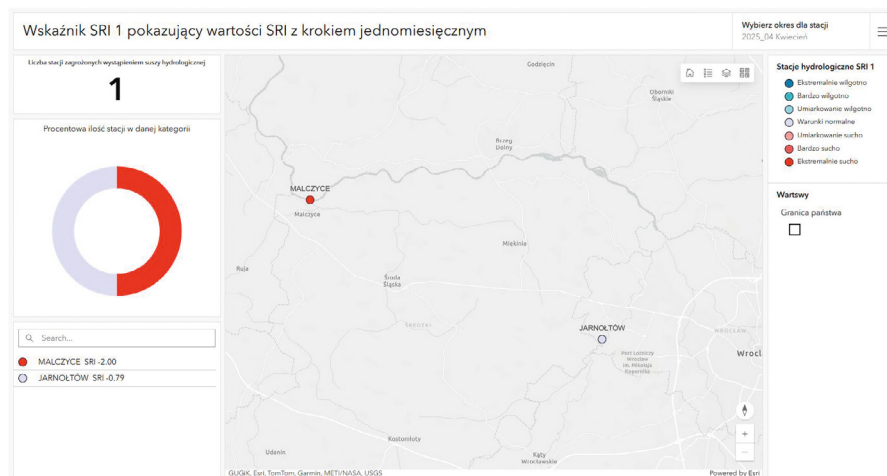
grafiki ilustrujące opisywane zagadnienie, np. fazy suszy. W zakładce tej wyjaśnione zostało pojęcie suszy oraz sposób jej pomiaru prezentowany w serwisie.

Kolejne podstrony odpowiadają za poszczególne wskaźniki suszy: SPI, SPEI i SRI. Podstrony te składają się z dwóch komponentów – dashboardów¹. W biuletynie suszowym, na panelu prezentującym wskaźnik SRI 1 (z krokiem jednomiesięcznym), w centralnej części znajduje się web mapa, czyli mapa z dynamicznie wyświetlaną treścią. Dla SRI 1 są to lokalizacje stacji hydrologicznych w jakich pozyskano dane do wyznaczania wskaźnika. Odpowiednio dobrana skala barwna pozwala zaprezentować przestrzenną zmienność wartości tego wskaźnika. Śledzenie zmienności czasowej umożliwia natomiast umieszczona w prawym górnym rogu rozwijana lista, pozwalająca na wybór konkretnego miesiąca, dla którego prezentowane są dane. Zmiana okresu skutkuje nie tylko aktualizacją mapy, ale wpływa na wszystkie elementy z jakich zbudowany jest ten dashboard. Lewą część panelu zajmują interaktywne, powiązane z oknem mapy, widżety (ang. widgets). W zależności od wyboru miesiąca oraz skali mapy, wartość liczbową w lewym górnym rogu panelu wskazuje na liczbę stacji zagrożonych suszą hydrologiczną – wartość SRI 1 mniejsza niż –1. Podobnie działa wykres kołowy przedstawiający udział procentowy wartości SRI 1 dla widocznych na mapie stacji w podziale na klasy. Zmniejszenie skali mapy automatycznie skutkuje zmianą tych dwóch widżetów. Ostatnim elementem jest lista aktualnie widocznych na mapie stacji hydrologicznych wraz z wartością wskaźnika SRI 1. W zależności od wartości wskaźnika symbol stacji przyjmuje odpowiedni kolor skali barwnej. Wartości wskaźnika zmieniają się wraz ze zmianą miesiąca w liście rozwijanej. W taki sam sposób skonstruowany jest panel prezentacji współczynnika SRI2 dla kroku trzymiesięcznego. Dodatkowo, oprócz dynamicznych elementów, dla obu wskaźników zestawione zostały miniaturki map pokazujące ich rozkład przestrzenny w każdym analizowanym miesiącu.

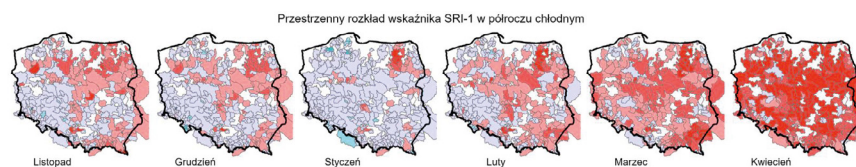
Przedstawiony biuletyn suszowy jest tylko jedną z wielu możliwości, jakie oferuje platforma Enterprise. Stosunkowo prosta



Dashboard prezentujący wskaźnik SPI 1.



Zmiana widżetów w zależności od skali mapy.



Panel prezentacji współczynnika SRI 1 z miniaturami map.

obsługa aplikacji sprawia, że dostęp do zaawansowanych technik wizualizacji jest dużo łatwiejszy dla większej grupy pracowników IMGW-PIB. Zróżnicowana forma prezentacji danych znacznie ułatwia analizę przestrzenną i czasową zjawiska suszy. Zintegrowane poszczególne elementy dashboardów umożliwiają przedstawienie tego zjawiska zarówno w skali

całej Polski, jak i pojedynczych stacji, bez konieczności przeglądania długich zestawień tabelarycznych czy opisów. Dzięki innowacyjnym funkcjonalnościom, takim jak automatyzacja procesów i udostępnianie treści, platforma ta znacząco podnosi efektywność pracy zespołów analitycznych, a także ułatwia dostęp do istotnych informacji dla różnych grup odbiorców. ◀

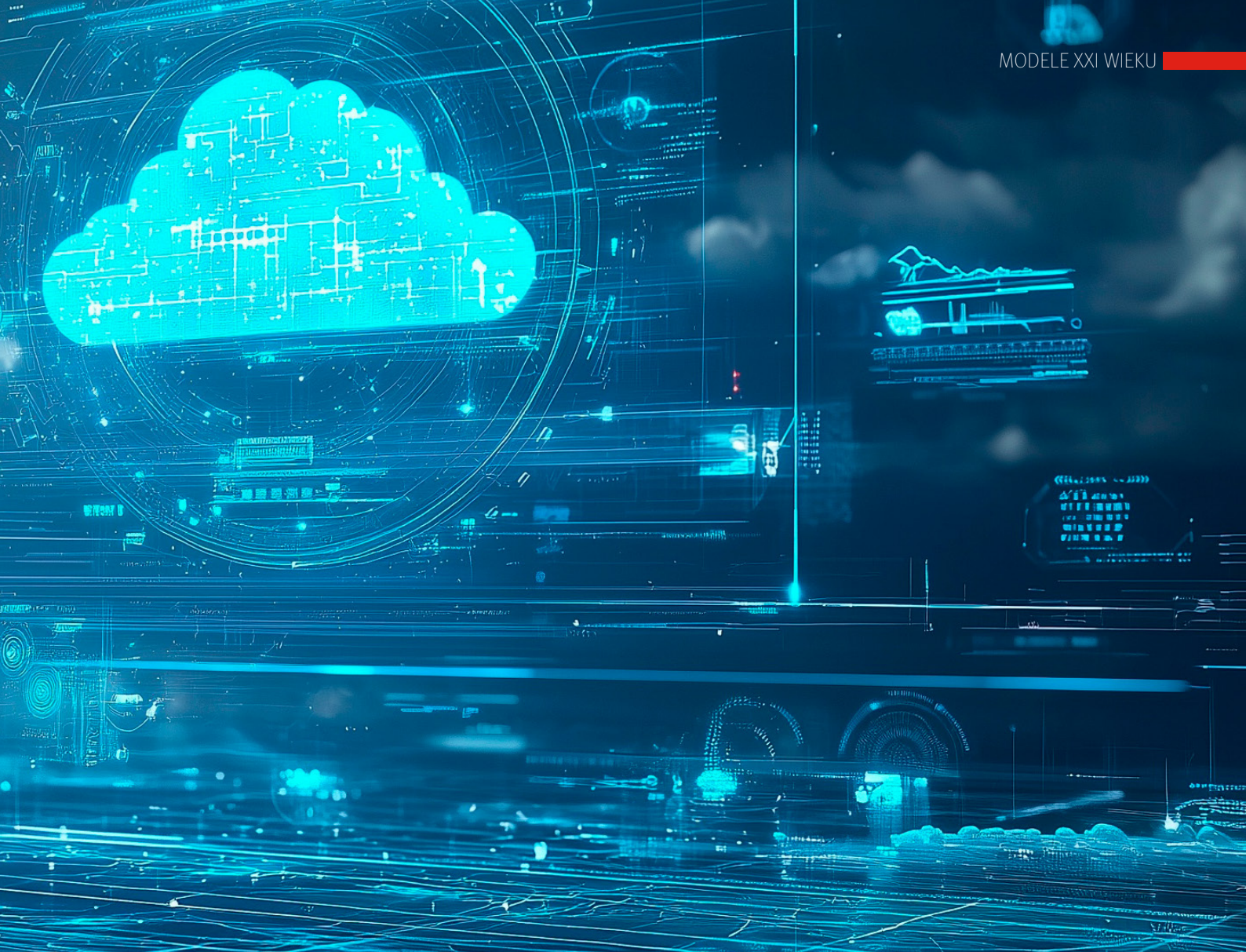
¹Dashboard, tłumaczony jako panel danych, to aplikacja służąca do publikacji różnych form prezentacji danych w postaci: map, statystyk i wykresów czy tabel dynamicznie zmieniających się w zależności od obszaru prezentowanych danych.



Czy AI wspomogę szybsze i jakościowe prognozowanie pogody?

Modele wykorzystujące techniki uczenia maszynowego (ML) prezentują coraz lepsze wyniki, które zaczynają dorównywać tym generowanymi przez numeryczne modele pogody (NWP). Wyzwaniem pozostają wymagające scenariusze pogodowe, jednak korzyści stosowania modeli wspieranych narzędziami sztucznej inteligencji (AI) – tj. zdecydowanie krótszy czas tworzenia prognozy i mniejsze potrzeby sprzętowe – wydają się być kluczowe dla ich przyszłości. W Laboratorium Modelowania Meteorologicznego IMGW-PIB realizowany jest projekt badający możliwości wdrożenia innowacji bazujących na narzędziach AI w procesie opracowywania prognoz pogody.

Jadwiga Róg, Robert Przyłuski*, Bogdan Bochenek, Piotr Sekuła, Adam Jaczewski, Marta Gruszczyńska, Joanna Wieczorek, Mariusz Figurski* | IMGW-PIB/Centrum Meteorologicznej Osłony Kraju, Laboratorium Modelowania Meteorologicznego



Obserwowany w ostatnich latach rozwój technik sztucznej inteligencji (ang. AI, Artificial Intelligence) oraz produktów i usług opartych na AI może przełożyć się na znaczny postęp w szybkości tworzenia i jakości symulacji w modelach prognozowania pogody. Obecnie do najbardziej popularnych i obiecujących rozwiązań należą GraphCast, PanguWeather i FourCastNet. Niewątpliwą zaletą tych modeli jest możliwość ich testowania na zasadzie licencji otwartego dostępu¹ i bez konieczności wykorzystania rozbudowanych zasobów sprzętowych. Oczywiście działania te wymagają umiejętności i sprawnego posługiwania się językami programowania.

CHARAKTERYSTYKA MODELI AI

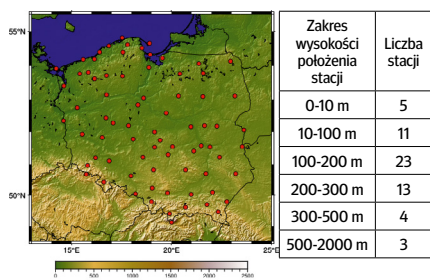
	GraphCast (Google)	Pangu-Weather (Huawei)	FourCastNet v2 (NVIDIA)
Architektura	Grafova sieć neuronowa z autoenkoderem	Transformator Wizyjny z przestawnym oknem uwagi (SWIN)	Adaptacyjny neuronowy operator Fouriera
Horyzont prognozy	Do 10 dni	Do 15 dni	7 dni
Średni czas generowania prognozy	<1 minuta (10 dni)	~10 sekund (10-15 dni)	<2 sekundy (7 dni)
Źródło i dostępność	GraphCast	Pangu-Weather	FourCastNet

KUCHNIA PROJEKTU I MIERNIKI SUKCESU

Dobre porównanie wymaga referencji. Wyniki symulacji numerycznych z wykorzystaniem AI można odnieść do wartości z reanaliz numerycznych modeli pogody wykorzystywanych w IMGW-PIB² lub bezpośrednio do rejestrów z naziemnych stacji synoptycznych sieci IMGW-

-PIB. Drugie podejście – które zastosowano w projekcie – pozwala dodatkowo na ocenę trafności predykcji z uwzględnieniem marginesu błędu wnioskowania. Dane z symulacji z wykorzystaniem AI dostępne są dla każdego zainteresowanego na portalu GitHub w folderze „ai-models” z ecmwf-lab. Porównaniu

¹ W okresie rozpoczęcia prac (2024 r.) wszystkie z prezentowanych modeli wspomaganych AI pracowały na licencjach otwartego dostępu.
² Vademecum produktów https://modele.imgw.pl/cmmn/?page_id=6948.



Mapa Polski z zaznaczonymi 59 stacjami pomiarowymi wykorzystanymi do analizy oraz liczba stacji synoptycznych w każdej grupie wysokościowej uwzględnionej w porównaniu.

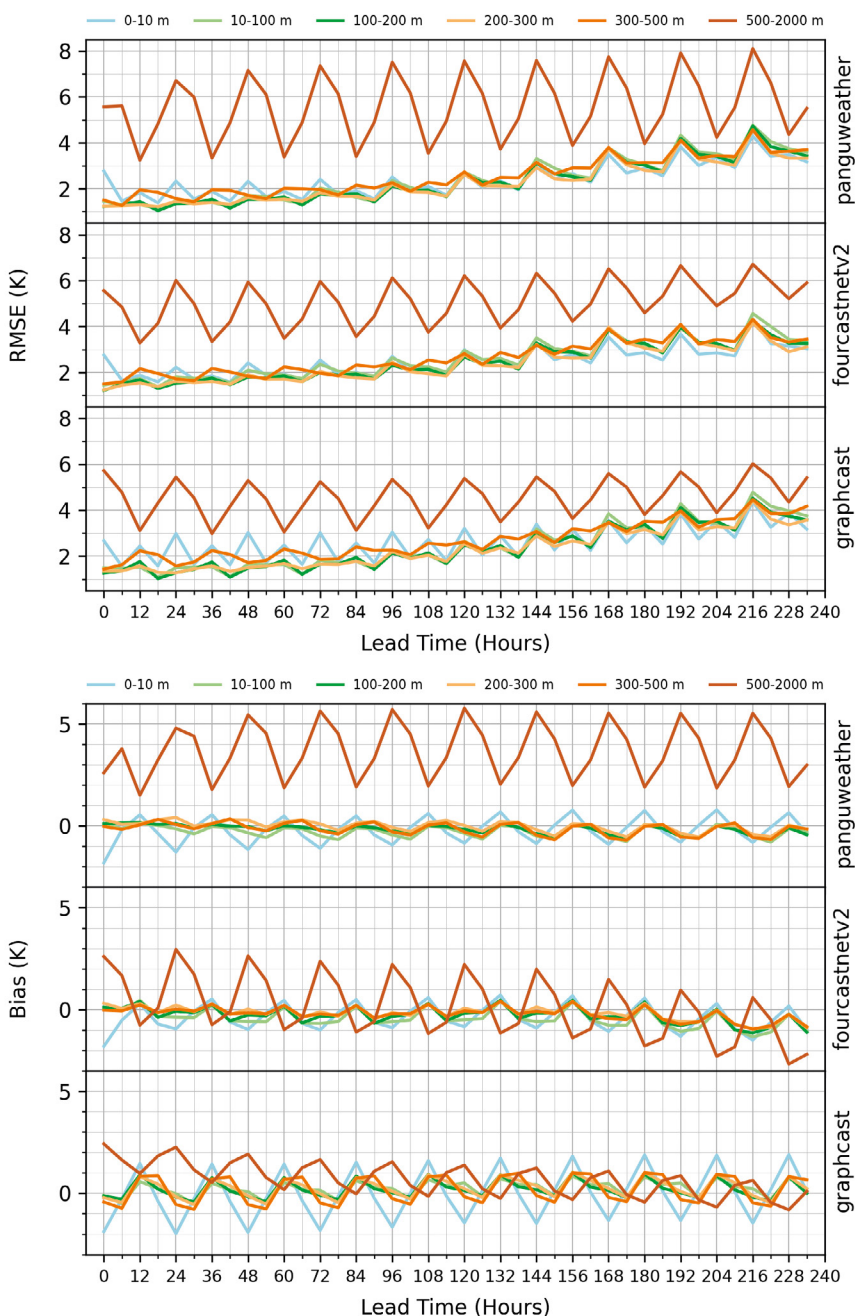
poddano wyniki modelowania w okresie od kwietnia do września 2024 roku.

W okresie tym model AI uruchamiano każdego kolejnego dnia. Prognoza obejmowała horyzont czasowy 10 dni, z krokiem co 6 godzin. Za dane wejściowe i początkowe każdorazowo uwzględniana była analiza ECMWF z poprzedniego dnia, z terminu 12:00 UTC. Wyniki modelowania temperatury powietrza na wysokości 2 metrów nad poziomem gruntu (T2m) poddano weryfikacji z wykorzystaniem oprogramowania HARP³. W celu usystematyzowania oceny zdecydowano się na porównanie wyników model AI z danymi z 59 stacji synoptycznych (według grup wysokościowych).

Do oceny trafności predykcji (w porównaniu do rzeczywistości) – czyli ustalenia jakości prognoz – wykorzystano klasyczne mierniki odnoszące się do wielkości błędu statystycznego, w tym najbardziej rozpowszechnione miary bias i RMSE⁴. Na ich podstawie wykazano, że prognozy generowane przez modele wspomagane AI prezentują bardzo dobre wyniki dla lokalizacji znajdujących się na wysokości poniżej 500 metrów n.p.m. Dla stacji górskich (Śnieżka, Zakopane, Kasprowy Wierch) błędy prognozy i ich zmienność, w analizowanym okresie od kwietnia do września, były wyraźnie większe niż dla terenów nizinnych.

CZAS I POMIAR

Każda opracowywana prognoza przyjmuje z założenia określony horyzont czasowy



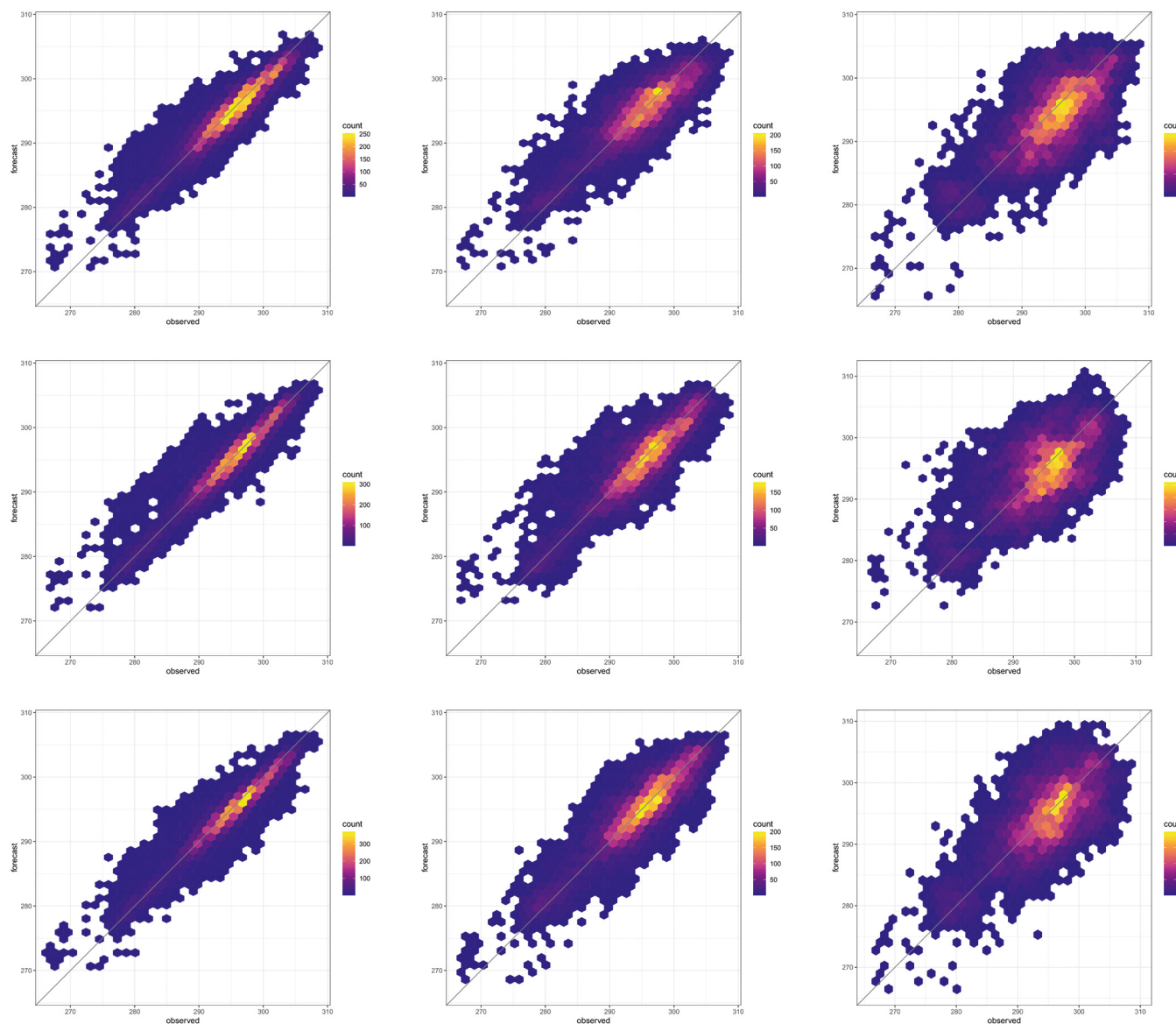
RMSE (a) oraz bias (b) dla każdego wyprzedzenia prognozy na podstawie danych od kwietnia do września 2024 roku.

– mówiąc w uproszczeniu, przed jej wygenerowaniem określa się na ile kroków (godzin do przodu) ma pokazać wyniki. Dłuższe prognozy, czyli na bardziej odległe terminy, mogą charakteryzować się niższą jakością predykcji w całej sekwencji. Może

się okazać, że prognoza dla terminu w kroku czasowym $x + 12h$ uzyskana z modelu na pojedynczy dzień (na 24 h) będzie miała inny wynik błędu niż prognoza na ten sam termin, ale z modelu dwudniowego (na 48 h) – i to z zastosowaniem tego samego

³ HARP – zestaw narzędzi do analizowania i weryfikowania prognoz numerycznych modeli pogody w języku programowania R.

⁴ Bias – czyli wartość przesunięcia, która stanowi wartość średnią pomiędzy wartościami przewidywanymi przez sprawdzany model a wartością rzeczywistą wskazaną jako referencyjna. Wysoka wartość bias oznacza, że model jest niedopasowany, nie potrafi celnie ująć wzorców w danych i je przeszacowuje. RMSE – ang. Root Mean Squared Error – czyli średni błąd kwadratowy przewidywania, daje informację czy błędy wynikające z przewidywania modelu są znaczne. Wyższa wartość RMSE oznacza, że model nie jest wystarczająco dokładny, by dobrze opisać rzeczywistość, którą miał zasymulować.



Wykresy heksagonalne porównujące prognozowane i obserwowane wartości temperatury powietrza dla trzech modeli AI z uwzględnieniem horyzonty prognozy: 1, 5 i 9 dni.

modelu prognozy pogody. Takie porównanie to analiza trendów na różnych czasach prognozy. Jak poradziły sobie modele wspomagane AI, widać na prezentowanych wykresach heksagonalnych. Wynika z nich, że każdy model z zadaniem w postaci przewidywania wartości T2m poradził sobie podobnie i uzyskiwał lepsze wyniki na krótszych czasach prognozy.

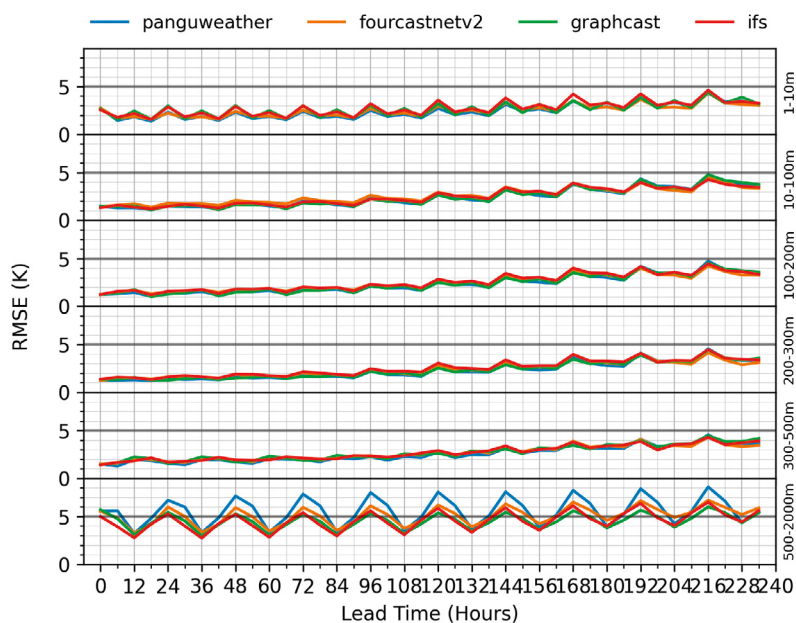
Model PanguWeather miał zauważalną tendencję do prognozowania nieco wyższych wartości temperatury względem danych po-

miarowych na stacji. To odchylenie nie było jednak na tyle nieistotne, aby jednoznacznie stwierdzić, że model ma tendencję do zawyżania wartości temperatury powietrza. Wszystkie trzy modele najlepiej poradziły sobie z prognozowaniem temperatur wokół 295 K (23°C) – takie wartości odpowiadają klimatowi europejskich nizin, co sugeruje, że testowane rozwiązania mogą być właściwe do pracy w europejskim obszarze osłony meteorologicznej. Bardzo słabe wyniki uzyskano w prognozach temperatury powietrza poniżej 285K dla okresu kwiecień-wrzesień.

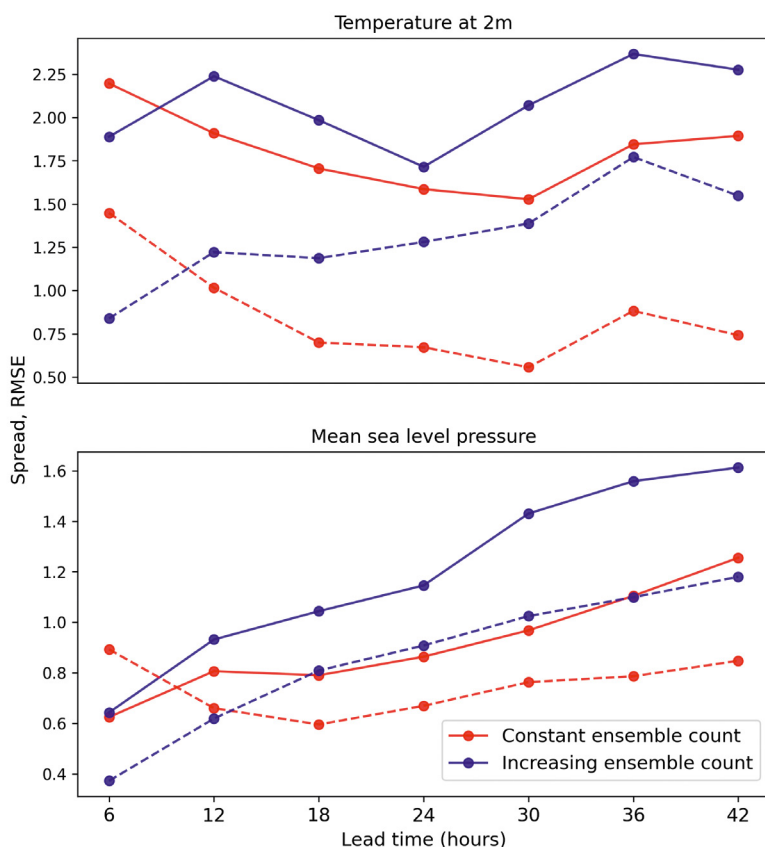
Może to wynikać m.in. ze spadku jakości prognoz w obszarach górskich, gdzie wystąpienie takich wartości było bardziej liczne. Wartym sprawdzenia pozostaje rozkład wyników prognoz w okresie zimowym.

NOWA GENERACJA VS MODELE TRADYCYJNE

Modele oparte na sztucznej inteligencji są coraz częściej uznawane za nową generację narzędzi do prognozowania pogody. Jednak kluczem do ich „sukcesu” jest i będzie uzyskiwanie wyników porównywalnych do



RMSE temperatury powietrza dla wszystkich trzech modeli AI oraz numerycznego modelu IFS. Kolejne grupy krzywych przedstawiają rozkład wyników według wysokości nad poziomem morza.



Porównanie RMSE i spread (rozrzut wyników wiązki) obu metod – średnia z prognoz dla 54 stacji synoptycznych.

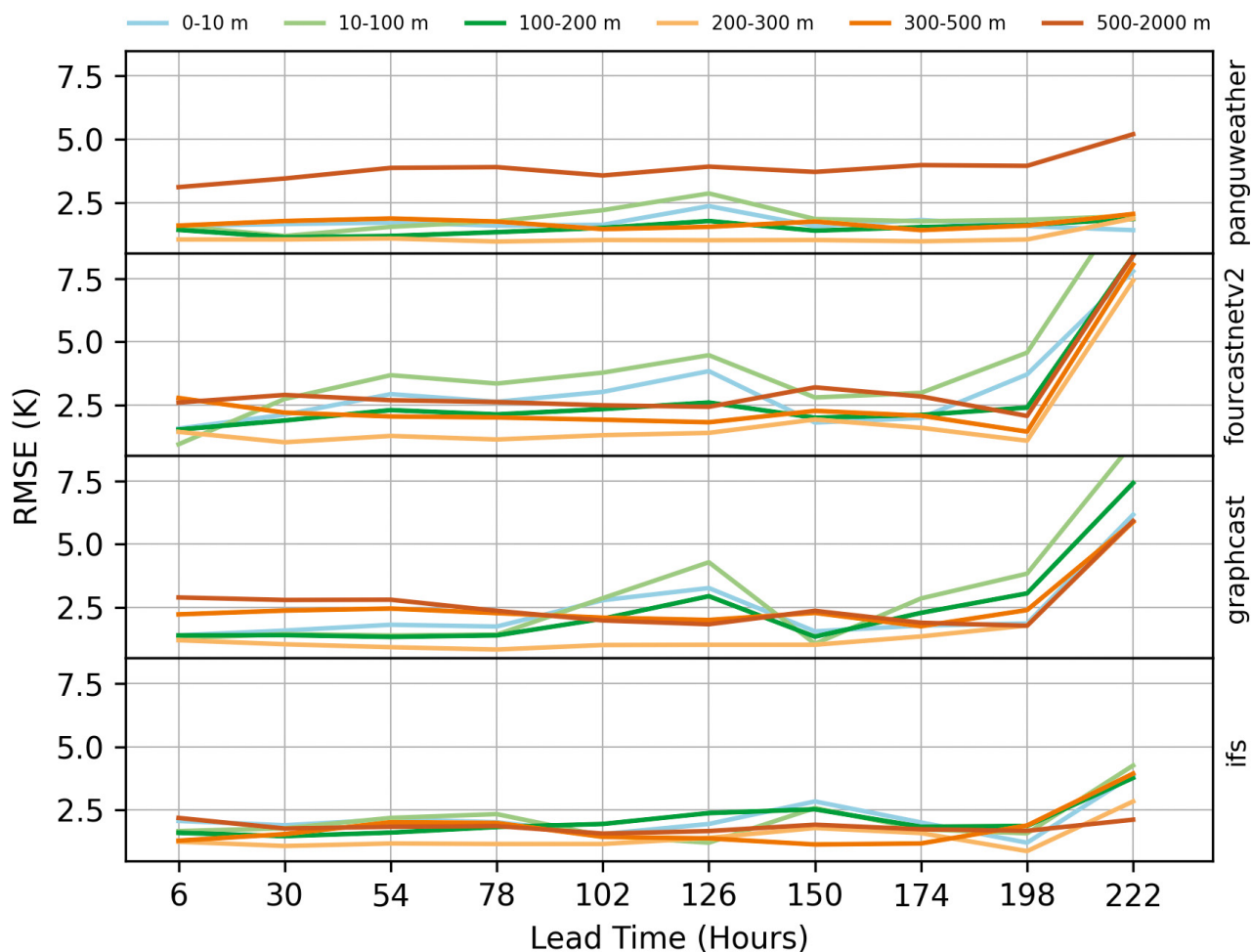
tych, które oferują „tradycyjne” modele numeryczne oparte na równaniach fizycznych i statystycznych. I chociaż modele działające na bazie AI nie znają praw fizyki, zamiast tego analizują ogromne ilości danych historycznych, to mogą przewidywać niektóre parametry meteorologiczne z jakością na poziomie dostarczanych przez modele fizyczne. Potwierdzają to testy przeprowadzone w ramach projektu. Niewątpliwą przewagą narzędzi opartych na sztucznej inteligencji jest ich wydajność – czas potrzebny na wygenerowanie 10-dniowej prognozy AI przy użyciu GPU, takiej jak GraphCast, wynosi poniżej 10 minut, w przeciwieństwie do kilku godzin w przypadku działania standardowych modeli. Otrzymujemy zatem prognozy o porównywalnej jakości, przy znacznie niższym zużyciu zasobów – tyle w teorii.

AI OD POJEDYNCZEJ PREDYKCJI DO WIĄZKI

Modele AI sprawdzają się przy testowaniu nowych metod i pomysłów usprawnienia różnorodnych modeli numerycznych. Jednym z obszarów zastosowania może być wspomaganie prognoz wiązkowych, tzw. ensemble⁵. W ramach jednego z takich testów przeprowadzonych w IMGW wykorzystany został model AI FourCastNet, który wytrenowany jest na globalnych reanalizach atmosferycznych (ERA5) z archiwów ECMWF z lat 1979-2015. FourCastNet to model globalny o rozdzielczości 0.25°, liczący stan atmosfery w 6-godzinowych odstępach (lub inaczej krokach czasowych). Tworzy prognozy dla kilku poziomów izobarycznych w atmosferze z uwzględnieniem dwudziestu elementów meteorologicznych. Jego wysoka rozdzielczość pozwala na porównanie wygenerowanych prognoz z prognozami modelu numerycznego IFS. Do testowania wybrano wartości predykcji ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza (MSLP) oraz temperatury powietrza (T2m).

Model uruchamiano codziennie, przez cały miesiąc, o północy czasu UTC. Wynikowa wiązka składała się ze 128 prognoz do 42 godzin do przodu. Wiazkę na końcu uśredniono i porównano z danymi obserwacyjnymi, aby obliczyć wartości błędów. Wyniki testów wykonanych dla 54 punktów

⁵ Prognozy wiązkowe mają postać zbioru realizacji prognozy, gdzie każda realizacja startuje z różnego stanu początkowego i wykorzystuje inne zmienne w procesie predykcji w celu określenia poziomu zaufania do danej realizacji. Więcej o prognozach wiązkowych https://cmr.imgw.pl/?page_id=43948.



RMSE dla analizowanych modeli. Czas prognozy odnosi się do liczby godzin poprzedzających 3 września 2024 roku, godz. 18:00.

(lokalizacji pokrywających się ze stacjami synoptycznymi w Polsce), w odniesieniu do czerwca 2024 roku, wykazały większą zmienność wartości uzyskanych dla temperatury powietrza niż ciśnienia atmosferycznego. Przyczyną jest prawdopodobnie większa naturalna fluktuacja temperatury powietrza, związana z jej cyklem dobowym.

Zastosowanie modelu AI FourCastNet zaoszczędziło czas i zasoby potrzebne do obliczeń w porównaniu do standardowego sposobu tworzenia prognozy wiążkowej, ponieważ początkowe kroki wymagają obliczenia o wiele mniejszej ilości osobnych prognoz. Dodatkowo, wprowadzanie nowych perturbacji na każdym kroku zwiększyło spread, czyli rozrzut prognoz w wiążce. Taki zabieg lepiej oddaje naturalną chaotyczność ruchów w atmosferze i symuluje więcej możliwych scenariuszy pogodowych.

PROGNOZA NA UPAL

W wielu regionach świata, również w Polsce, obserwuje się wzrost częstotliwości, czasu trwania i natężenia fal upałów. W ramach realizowanego w IMGW-PIB projektu sprawdzono czy modele wspomagane AI są w stanie poradzić sobie z predykcjami tych groźnych zjawisk na zadowalającym poziomie. Do analizy wybrano 3 września 2024 roku, kiedy temperatury w Polsce znacznie przekraczały wartość średnią dla terminu. W celu szerszego porównania sięgnięto również po wyniki prognoz modelu ECMWF IFS. Generalnie oba typy modeli miały trudności z dokładną predykcją wyjątkowo upalnych dni, chociaż nieco lepszą jakością charakteryzował się model tradycyjny (IFS).

Badania prowadzone w Laboratorium Modelowania Meteorologicznego poka-

zały, że modele oparte na AI już obecnie generują prognozy o jakości porównywalnej do standardowych modeli numerycznych – o ile sytuacja meteorologiczna nie jest skomplikowana. Znacznie szybsze jest również tempo ich pracy. Nie zauważono wyraźnych trendów w zawyżaniu lub zaniżaniu temperatury powietrza przez modele wspomagane sztuczną inteligencją. Dobrze radzą sobie one z prognozowaniem upałów – i to nawet w przebiegach z tygodniowym wyprzedzeniem. Natomiast ich jakość predykcji w terenach górskich i podgórszych jest wyraźnie słabsza, choć może to wynikać z ograniczeń w dostępie do precyzyjnych danych dla tych obszarów i wskazywać na większą potrzebę wytrenowania. ◀

*W chwili publikacji artykułu nie są już pracownikami IMGW-PIB.

Pogoda w cyfrowym świecie: jak Internet Rzeczy zmienia meteorologię

Jeszcze kilka dekad temu prognozowanie pogody opierało się głównie na obserwacjach meteorologów, ręcznym odczycie danych z analogowych przyrządów i bardzo uproszczonych modelach atmosferycznych. Dziś sytuacja wygląda zupełnie inaczej. Satelity, superkomputery i sztuczna inteligencja zmieniły nasze spojrzenie na świat. Rewolucja dokonała się również w obszarze pomiarów naziemnych. Dzięki rozwojowi technologii IoT (Internetu Rzeczy) jesteśmy w stanie nie tylko mierzyć, ale i rozumieć zjawiska atmosferyczne z precyzją, o jakiej kiedyś można było tylko marzyć.

Robert Bulawa | IMGW-PIB/ Centrum Hydrologiczno-Meteorologicznej Służby Pomiarowo-Obserwacyjnej, Wydział Serwisu Systemów Pomiarowych

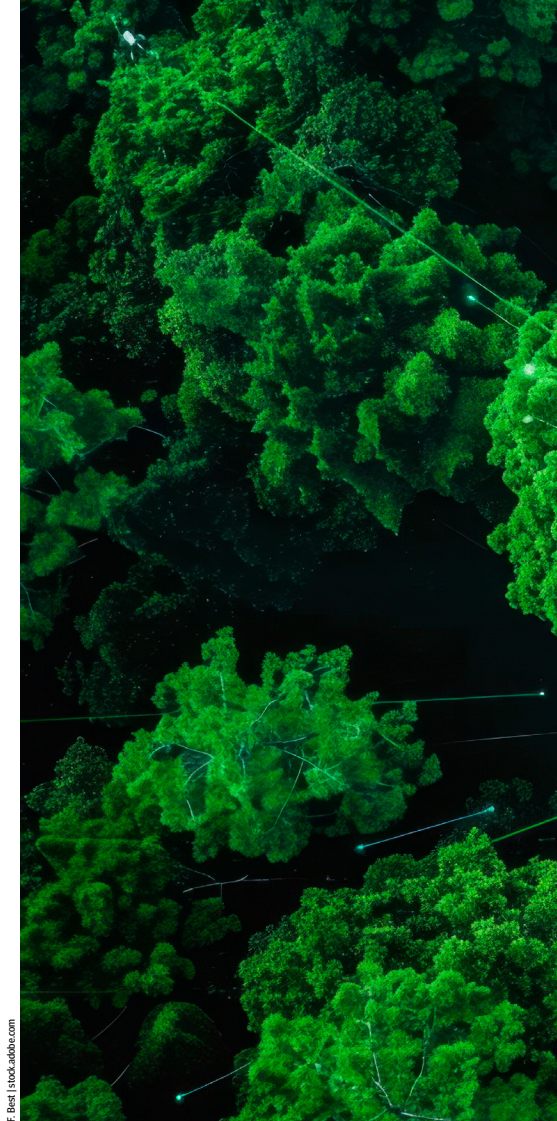
Wyobraźmy sobie gęstą sieć „elektronicznych zmysłów” rozmieszczonych na dachach budynków, polach uprawnych, lotniskach i przy rzekach. To właśnie sensory IoT – małe urządzenia rejestrujące temperaturę, wilgotność, opady, prędkość wiatru i wiele innych parametrów – które zbierają dane w czasie rzeczywistym i przekazują je do dedykowanej bazy danych. W odróżnieniu od tradycyjnych stacji meteorologicznych, urządzenia te nie wymagają obecności człowieka. Są samowystarczalne energetycznie (często zasilane panelami słonecznymi) i komunikują się bezprzewodowo – przez GSM, sieci LAN, a coraz częściej także LoRaWAN – system sprawdzający się w niedostępnych terenach.

Dane z czujników analizowane są natychmiast po przesłaniu, co pozwala na dynamiczne tworzenie prognoz i generowanie ostrzeżeń przed ekstremalnymi zjawiskami pogodowymi. Zmiana ciśnienia? Nagły spadek temperatury? Czujniki reagują w ciągu sekund, a system może automatycznie poinformować służby zarządzania kryzysowego, rolników czy zarządców infrastruktury. To właśnie prędkość i zasięg informacji sprawiają, że IoT staje się jednym z filarów nowoczesnej meteorologii. Jednym z najdynamiczniej rozwijających się rozwiązań w tym segmencie są automatyczne stacje pogodowe All-in-one.

ALL-IN-ONE – TECHNOLOGIE PRZYSZŁOŚCI DOSTĘPNE DLA KAŻEGO

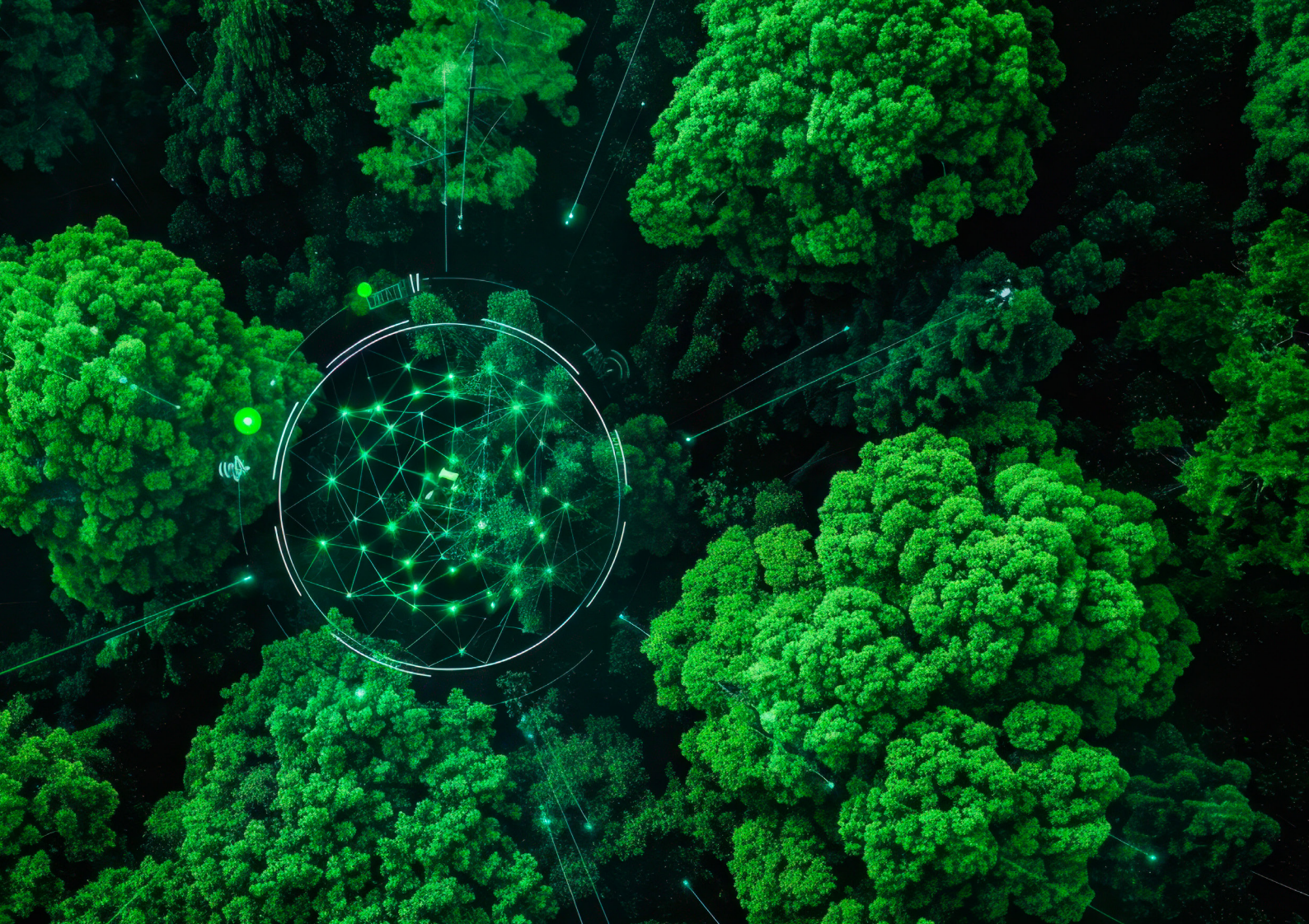
Kompaktowe, precyzyjne i wszechstronne. Dzięki tym funkcjonalnościom współczesne stacje pogodowe stają się realną alternatywą dla klasycznych systemów pomiarów naziemnych. Mogą współpracować z aplikacjami mobilnymi oraz portalami internetowymi, co zapewnia dostęp do danych w czasie rzeczywistym z dowolnego miejsca. Pracę stacji kontroluje się zdalnie, a wbudowane w nią technologie pozwalają automatycznie i równocześnie zbierać różne dane o warunkach pogodowych i integrować je z danymi z innych systemów. To natomiast umożliwia bardziej kompleksową analizę, a tym samym podejmowanie lepszych decyzji. Tego typu rozwiązania oferują m.in. firmy Vaisala, Lufft czy Milesight.

Vaisala posiada całą serię czujników meteorologicznych umożliwiających monitoring do sześciu różnych parametrów, a najnowsza wersja WXT530 pozwala mierzyć kilka z nich jednocześnie. Dzięki niskiemu poborowi prądu poszczególne modele mogą być zasilane z ogniwa fotowoltaicznego. Czujniki wyposażone są w wyjścia cyfrowe RS232, RS485 | RS422 oraz SDI-12. Wszystkie one mają zaimplementowany protokół transmisji NMEA, ASCII z możliwością ustawienia transmisji terminalowej.



F. Beif | iStock.adobe.com

Rodzina urządzeń WS firmy Lufft to kompaktowe stacje pogody, służące do pomiaru wielu zmiennych pomiarowych. Znajdują zastosowanie w monitoringach środowiskowych czy systemach zarządzania ruchem drogowym. Zależnie od modelu, każde urządzenie ma inną kombinację czujników do pomiaru różnych zmiennych pomiarowych. Dla przykładu stacja WS700-UMB pozwala mierzyć kierunek i prędkość wiatru, temperaturę, wilgotność względną, intensywność, ilość i rodzaj opadów, ciśnienie atmosferyczne oraz promieniowanie słoneczne. Dodatkowe zmienne – m.in. punkt rosy, wilgotność bezwzględna i współczynnik zmieszania – są wyliczane z temperatury i wilgotności, uwzględniając ciśnienie. Dane pomiarowe można uzyskać za pomocą następujących protokołów: UMB-Binarny, UMB-ASCII, SDI-12, MODBUS. Do stacji można podłączyć jeden zewnętrzny czujnik temperatury.



Kolejna propozycja to rozwiązanie firmy Milesight. WTS506-868M jest innowacyjną stacją pogodową wyposażoną w zaawansowane czujniki LoRaWAN, zapewniające precyzyjne pomiary temperatury, wilgotności, ciśnienia atmosferycznego i opadów. Została zaprojektowana z myślą o zastosowaniach przemysłowych i komercyjnych. Wykorzystuje technologię LoRaWAN, dzięki czemu zasięg transmisji danych wynosi do 2 km na obszarach miejskich i do 15 km na terenach wiejskich. Stacja jest przystosowana do pracy w trudnych i wilgotnych warunkach. Na bazie tego modelu firma Milesight opracowała kompleksowy pakiet do automatycznego zbierania i analizowania danych o różnych warunkach atmosferycznych, w tym temperatury, wilgotności powietrza, wilgotności gleby, przewodności elektrycznej i wielu innych. Rozwiązanie to wspiera automatyczne zarządzanie i planowanie uprawami.

Poza stacjami typu All-in-one na rynku dostępne są również urządzenia niezależne, jak np. czujniki temperatury z dedykowanym rejestratorem, który pozwala na ciągły pomiar, z możliwością dostosowania interwałów rejestracji danych do potrzeb użytkownika. Łączność Wi-Fi i LAN zapewnia zdalny dostęp do danych w czasie rzeczywistym. Takie sensory wykorzystuje się m.in. do monitorowania temperatury w kilku niezależnych punktach. Charakteryzują się one szerokim zakresem pomiarowym, wysoką dokładnością oraz możliwością pracy na zasilaniu sieciowym i akumulatorowym. Są idealnym rozwiązaniem do zastosowań w magazynach, laboratoriach i innych miejscach wymagających precyzyjnej kontroli temperatury. Wbudowana pamięć tymczasowa przechowuje dane w trybie offline przy utracie łącza, a po odzyskaniu połączenia synchronizuje pomiary z chmurą. Dostępne są konfigurowalne progi alarmowe z natychmiastowymi powiadomieniami (push, SMS, e-mail) w przy-

padku wykrycia odchyleń od normy. Ważnym elementem jest funkcja współdzielenia urządzenia, a więc jednoczesny dostęp większej liczby użytkowników. Dzięki temu powiadamianie o zdarzeniach krytycznych widoczne jest dla wszystkich użytkowników korzystających w danym momencie z urządzenia.

Czy Internet Rzeczy zrewolucjonizuje meteorologię tak, jak kiedyś zrobili to satelity? Wiele wskazuje na to, że tak. Czujniki nie tylko mierzą, ale i przewidują. Dzięki integracji danych z wielu punktów – od poziomu rzek po wilgotność powietrza – możliwe jest tworzenie złożonych modeli predykcyjnych. IoT przestaje być jedynie dodatkiem – staje się centralnym punktem w budowie zrównoważonych, odpornych na zmiany klimatu systemów zarządzania przestrzenią i zasobami. Rewolucja technologiczna w meteorologii dzieje się tu i teraz – nad naszymi głowami, pod naszymi stopami i... w naszych kieszeniach. ◀

HYDRO.IMGW.PL

INFORMACJE HYDROLOGICZNE NA WYCIĄGNIĘCIE RĘKI!

**Najlepszy serwis hydrologiczny w Polsce i na świecie.
Dane, pomiary, prognozy, ostrzeżenia –
wszystko w jednym miejscu.**



HYDRO
IMGW-PIB
hydro.imgw.pl

SPRAWDŹ!

