

5. PODSUMOWANIE

Celem pracy jest prezentacja nowych możliwości obserwacji zjawisk lodowych na dużych rzekach nizinnych za pomocą radarowych obrazowań satelitarnych. Jako obiekt badań wybrano Jezioro Zegrzyńskie, sztuczny zbiornik położony przy stopniu wodnym Dębe na dolnej Narwi, do którego uchodzi Bug.

W celu ułatwienia interpretacji danych satelitarnych wskazane jest dobre zrozumienie funkcjonowania badanego obiektu, co jest szczególnie ważne w przypadku rzek i zbiorników sztucznych, które charakteryzują się dużą zmiennością przepływu, transportu osadów, przebiegu zjawisk lodowych. W tym celu omówiono wyniki badań Jeziora Zegrzyńskiego w zakresie jego batymetrii, hydrologii, ustroju termicznego i lodowego. Wyniki badań z zastosowaniem modelowania hydrodynamicznego ułatwiają zrozumienie sposobu funkcjonowania zbiornika i przebiegu zjawisk lodowych rejestrowanych za pomocą metod teledetekcyjnych.

Jako metodę badań teledetekcyjnych zastosowano interpretację wizualną przetworzonych cyfrowo obrazów satelitarnych misji Sentinel-1. Wykorzystano dwa produkty z pierwszego poziomu przetworzenia, a mianowicie SLC i GRDH rejestrowane w trybie IW. Do przetworzeń obrazów radarowych stosowano oprogramowanie SNAP, a do ich wizualizacji program QGIS.

Interpretacja wizualna zobrażeń pokrywy lodowej na zbiorniku i korycie rzeczonym w początkowej fazie tworzenia napotyka na trudność w odróżnieniu rzeki wolnej od lodu i (FW) klasy lodu brzegowego (SI). Powodem tego ograniczenia jest bardzo niska wartość rozproszenia wstecznego rejestrowanego na obrazach w warunkach zwierciadlanego odbicia wiązki radarowej, jak i podobne właściwości fizyczne obu powierzchni. W związku z tym zarejestrowane na zobrażowaniu piksele charakteryzują się bardzo niską jasnością, dotyczy to zarówno produktów GRDH jak i SLC, a także obydwu kanałów polaryzacji.

Problemem okazało się również zinterpretowanie zasięgu stałej pokrywy pokrywy lodowej z lodu jeziornego, bowiem ze względu na niskie wartości rozproszenia wstecznego, możliwe jest jej błędne przyporządkowanie do innej klasy np FW lub SI. Dodatkowo w procesie interpretacji należałoby bardziej szczegółowo podzielić klasę pokrywy lodowej (np. lód zbudowany z luźnych i gładkich form lodu mobilnego oraz lód zbudowany ze stłoczonych i zagęszczonych form), ze względu na odmienny charakter gromadzenia się ruchomych form lodowych, co w efekcie daje większą chropowatość powierzchni. Taką różnicę zaobserwowano na analizowanych zobrażowaniach Sentinel-1 zarejestrowanych w dniach 16, 18 i 19 I 2018 r., gdzie na samym Jeziorze Zegrzyńskim występowała gładka forma pokrywy lodowej (możliwa do interpretacji wizualnej z uwagi na obecność charakterystycznych spękań), a w ujściu Bugu uformowała się pokrywa z lodu mobilnego, tworzącego w niektórych miejscach zatory. Potwierdzono również, że najłatwiejsza do rozpoznania jest spiętrzona pokrywa lodowa, utworzona ze stłoczonych krążków śryżowych.

W przypadku zobrażeń Sentinel-1 większą przydatnością okazały się produkty GRDH. Ich zaletą jest łatwość przetwarzania i mniejsze objętości plików danych (pojedyncza scena to ok 1 GB). Używając kompozycji RGB można w krótkim czasie przeanalizować ogólną sytuację lodową na dużym odcinku rzeki lub zbiornika. Wykazano przydatność danych satelitarnych SAR Sentinel-1 do operacyjnego wykorzystania np. przy sporządzaniu raportów zjawisk lodowych dla potrzeb RZGW.

Nieco gorszą przydatnością okazały się produkty SLC, które mimo większej rozdzielczości przestrzennej i zawartej informacji, w procesie wstępnego przetwarzania

traciły swoją czytelność. Powodem pogorszenia się jakości obrazu była obecność szumu cętkowatego oraz spadek czytelności po zastosowaniu filtrów cyfrowych.

Analiza właściwości statystycznych wartości rozproszenia wstecznego wykazała, że dla klasy rzeki wolnej od lodu (FW), lodu brzegowego (SI), a także dla ciągłej pokrywy lodowej (IC), statystyki prób były do siebie zbliżone. Pozostałe klasy charakteryzowały się większym zróżnicowaniem. Najbardziej odróżniającymi się wartościami rozproszenia wstecznego wykazała się klasa spiętrzonyj pokrywy lodowej, zbudowanej ze stłoczonej formy lodu mobilnego – śryżu (CI). Największą jednorodnością danych charakteryzuje się klasa rzeki wolnej (FW) i lodu brzegowego (SI). Jeśli chodzi o największe zróżnicowanie wartości rozproszenia wstecznego, zaobserwowano je na zobrażowaniach GRDH, gdzie w przypadku danych o polaryzacji VH i VV, kanał VV zarejestrował znacznie wyższe wartości w każdej klasy. Produkty SLC niestety nie wykazały znacznego zróżnicowania wartości rozproszenia wstecznego, co przekłada się na mniejszą przydatność tego źródła danych do prowadzonych w trybie operacyjnym analiz typów pokrywy lodowej.

Jak wykazano na przykładzie Jeziora Zegrzyńskiego obrazowania z danych satelitarnych SAR Sentinel-1 mogą dostarczyć danych do wstępnej analizy sytuacji lodowej. Jednym z największych atutów tego typu danych jest możliwość pozyskania ich bezpłatnie w ramach programu Copernicus. Zaletą tego źródła danych jest też ich częstotliwość pozyskiwania co 1–2 dni, co pozwala na dosyć regularną obserwację zjawisk lodowych, ich rozwoju i procesu zanikania. Produkty GRDH dostępne są do pobrania z serwerów programu Copernicus już kilka godzin po zarejestrowaniu danego obszaru przez satelitę Sentinel-1.

Kolejnym atutem satelitarnych obrazów radarowych Sentinel-1 jest możliwość uzyskania obrazu niezależnie od warunków oświetleniowych czy zachmurzenia. W przypadku zobrażeń radarowych, warto jest w procesie interpretacji wizualnej porównywać je z obrazami wielospektralnymi (np. Sentinel-2, Landsat), które dostarczają dodatkowych informacji przydatnych zwłaszcza w rozróżnieniu inicjalnej pokrywy lodowej od wody, a także gładkiego lodu jeziornego od lodu ze spiętrzonego lodu mobilnego.

Satelitarne obrazy radarowe mogą wspomagać systemy monitoringu zjawisk lodowych i prognozowania wystąpienia ryzyka powodzi zatorowych. Możliwość śledzenia położenia krańca zatoru śryżowego na obrazach Sentinel-1 jest przydatna w kontekście oceny warunków hydraulicznych w korycie rzeki w pobliżu posterunków wodowskazowych. Na przykładzie przyrostu pokrywy lodowej na Bugu w dniach 24–26 II 2018 r. pokazano jaki wpływ na przebieg stanów wody w posterunkach wodowskazowych Popowo i Wyszków ma lokalne spiętrzenie przepływu w rejonie krańca zatoru śryżowego.

W czasie rozpadu pokrywy lodowej na Jeziorze Zegrzyńskim obrazy satelitarne SAR Sentinel-1 dostarczają bardzo cennych informacji o strefach wolnych od lodu i pokrytych lodem jeziornym. W fazie zaniku zjawisk lodowych rozróżnialność lodu jeziornego od wody jest znacznie lepsza niż w okresie tworzenia się pokrywy. Lód jeziorny w fazie rozpadu ma w swojej strukturze dużo pęcherzyków powietrza, które zwiększają zdolność lodu do odbicia objętościowego fali radarowej.

Projekcje zmian klimatu w wyniku ocieplenia wskazują, że czas trwania zjawisk lodowych na rzekach i jeziorach będzie ulegać dalszemu skróceniu. Ciepłsze zimy oznaczają zatem możliwość nakładania się na siebie kolejnych faz zlodzenia, które mogą być przedzielone okresami bez pokrywy lodowej. W warunkach ustroju lodowego Bugu i Narwi charakterystyczna jest duża produkcja śryżu, który może tworzyć lokalne zatory (przykład z Pułtuska w dniu 19 I 2018 r.). Program

Sentinel-1 będzie w przyszłości uzupełniony o trzeciego satelitę, dzięki czemu codziennie dostępne będą obrazy SAR.

W 2019 r. firma Astri Polska opracowała podobny system do monitoringu lodu na rzekach w Polsce w ramach projektu EO4EP (Earth Observations for Eastern Partnership) realizowanego na zlecenie Europejskiej Agencji Kosmicznej i Banku Światowego. Obecnie trwają prace nad opracowaniem systemu monitorowania pokrywy lodowej na wodach śródlądowych Europy z wykorzystaniem danych z programu „Copernicus” pozyskane przez satelitę optycznego Sentinel-2. Monitoringiem objęte zostaną wody śródlądowe znajdujące się w bazie Europejskiej Agencji Środowiska „EU-Hydro”, tj. rzeki i kanały o szerokości powyżej 50 metrów i zbiorniki wodne o szerokości powyżej 100 metrów, lub powierzchni powyżej 1 hektara. Usługa będzie darmowa i ogólnodostępna wspomagając administrację wodną przez udostępnianie informacji o stanie wód dla dużego obszaru w krótkim czasie po wykonaniu zdjęcia (<https://astripolska.pl/>).

Nowym źródłem danych jest także repozytorium obrazów Sentinel 1 i 2 uruchomione w końcu 2020 r. w ramach programu Sat4Envi realizowanego przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej we współpracy z programem Copernicus. Ośrodek zbierania danych satelitarnych jest zlokalizowany w Krakowie, ma także własne centrum odbioru danych z satelity Sentinel-1. Dostęp do danych jest możliwy przez internet pod adresem <https://dane.sat4envi.imgw.pl/>

Autorzy mają nadzieję, że przedstawione w pracy proste metody przetwarzania satelitarnych obrazów radarowych i ich interpretacji znajdą zastosowanie w praktyce i stanowią będą inspirację dla następnych prac z zastosowaniem polarymetrii, czasowej analizy zmienności rozproszenia wstecznego i klasyfikacji. Powstanie tego opracowania było możliwe dzięki udostępnieniu wielu danych zbieranych w trybie operacyjnym przez RZGW Warszawa, za co autorzy bardzo dziękują.

Adres do korespondencji – Corresponding autor:

dr hab. Artur Magnuszewski, prof. ucz., Uniwersytet Warszawski, ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa, e-mail: asmagnus@uw.edu.pl

Karolina Olszanka, Uniwersytet Warszawski, ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa, e-mail: k.olszanka@student.uw.edu.pl