

## Streszczenie

Praca przedstawia możliwości wykorzystania satelitarnych obrazów radarowych Sentinel-1 do rozpoznawania zjawisk lodowych na Jeziorze Zegrzyńskim. Jezioro Zegrzyńskie jest sztucznym zbiornikiem, który powstał w wyniku przegrodzenia stopniem wodnym Narwi. Jest to zbiornik wykorzystywany dla celów energetyki wodnej, a także zaopatrzenia w wodę Warszawy. Najwyższy poziom piętrzenia Narwi przez stopień Dębe wynosi 7,10 m, przeciętnie piętrzenie to około 6,8 m. Cofka Jeziora Zegrzyńskiego sięga na Narwi w rejon Pułtuska – km 63,3, a na Bugu do miejscowości Popowo – km 17,0. Jezioro ma objętość 89,9 hm<sup>3</sup>, powierzchnię 33 km<sup>2</sup>, długość około 40 km, przy średniej głębokości 2,86 m oraz długość brzegów 219 km. Dorzecze zamknięte stopniem w Dębe ma powierzchnię 69,7 tys. km<sup>2</sup>. Średni wieloletni przepływ z 1951–2010 wynosi w profilu Narew/Zambski Kościelne 139 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> oraz Bug/Wyszaków 162 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Czas wymiany wody w zbiorniku jest krótki i wynosi 3–4 dni. Na podstawie danych z lat 1961–1990 ustalono że wielkość transportu rumowiska unoszonego w profilu Wyszaków na Bugu zawiera się w granicach 153.000–24.500 Mg·rok<sup>-1</sup>, a dla Narwi w profilu Ostrołęka wielkość transportu zawiesiny jest znacznie mniejsza wynosi bowiem 31.300 Mg·rok<sup>-1</sup>. Wskaźnik denudacji obliczony na podstawie danych w lat 1951–1990 w przypadku Narwi profil Ostrołęka wynosi on 1,4 Mg·rok<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>, dla Bugu w profilu Wyszaków sięga on 3,2 Mg·rok<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>.

Przedstawiono warunki hydrauliczne w Jeziorze Zegrzyńskim, których rozpoznanie było możliwe dzięki zastosowaniu modelu dwuwymiarowego CCHE2D. Wynik modelowania hydrodynamicznego pokazuje także, że Bug wprowadza ładunek zawiesiny, która wpływa do dużego plosa i dopiero tam ulega sedymentacji oraz rozcieńczeniu. Woda z Narwi i Bugu w miejscu połączenia rzek nie ulega mieszanemu, obydwa strumienie płyną równolegle, dopiero w dużym plosie występują warunki do mieszania się wód w wyniku oddziaływania wiatru i falowania. Taki układ linii prądu w ujściu Bugu do Narwi i w czaszy zbiornika potwierdziły obrazy hiperspektralne wykonane za pomocą lotniczych skanerów AISA i HySpex. Układ równoległych strumieni wody z Narwi i Bugu, które nie mieszają się ze sobą przed plosiem małym i dużym, jest często obserwowany na obrazach multispektralnych misji Sentinel-2, na przykład obraz z dnia 31 VIII 2017 r. Na procesy transportu osadów i mieszania się wód Narwi i Bugu oddziałuje także pole wiatru, które deformuje linie prądu zwłaszcza w części jeziornej zbiornika. Za pomocą dwuwymiarowego modelu hydrodynamicznego CCHE2D wykonano symulacje oddziaływania wiatru na linie prądu w warunkach przepływu średniego. Przyjęto cztery główne kierunki wiatru N, S, W, E i prędkość wiatru 1 m·s<sup>-1</sup>. W warunkach oddziaływania wiatru z kierunków S, W, E w dużym i małym plosie tworzy się zamknięty układ cyrkulacji. Jest to zjawisko istotne w przypadku transportu osadów, a także napływu lodu w formie śryżu oraz zaniku pokrywy lodowej i spływu kry. Zachowany zostaje jednak główny strumień przepływu w dawnym korycie Narwi. W przypadku wiatru z kierunku N główny strumień przepływu zostaje przesunięty w stronę południowego brzegu zbiornika, nawiązując do ukształtowania brzegów w plosie małym i dużym. Omówiono definicje i przebieg formowania się zjawisk lodowych na rzekach i na jeziorach w warunkach Polski. Wykorzystano obserwacje terenowe do opisu poszczególnych form zlodzenia. Nowym rodzajem danych teledetekcyjnych są satelitarne obrazy SAR rejestrowane z pokładu satelity Sentinel-1. Dla celów obrazowania zjawisk lodowych na Jeziorze Zegrzyńskim wykorzystano produkty GRDH i SLC i ich przekształcenia do poziomu kompozycji barwnej. Na zobrazowaniach SAR Sentinel-1 z zimy 2018 r. dokonano wydzielenia następujących

klas zjawisk lodowych: rzeka wolna od lodu, lód brzegowy, śryż, pokrywa lodowa, spiętrzona pokrywa lodowa ze śryżu. Porównano wartości odbicia wstecznego dla tych klas w produktach GRDH i SLC. Na przykładzie zlodzenia Bugu przedstawiono możliwość wykorzystania obrazów z produktu GRDH do tworzenia raportów lodowych i wykrywania oddziaływania zatoru na stany wody. W przypadku zobrazowań Sentinel-1 większą przydatnością okazały się produkty GRDH. Ich zaletą jest łatwość przetwarzania i mniejsze objętości plików danych. Używając kompozycji RGB można w krótkim czasie przeanalizować ogólną sytuację lodową na dużym odcinku rzeki lub zbiornika. Nieco gorszą przydatnością okazały się produkty SLC, które mimo większej rozdzielczości przestrzennej i zawartej informacji, w procesie wstępnego przetwarzania straciły swoją czytelność. Powodem pogorszenia się jakości obrazu była obecność szumu cętkowatego oraz spadek czytelności po zastosowaniu filtrów cyfrowych.

**Słowa kluczowe:** Jezioro Zegrzyńskie, Bug, Narew, zjawiska lodowe, obrazy satelitarne, SAR, Sentinel-1