

tempo rozwoju zatoru od miejsca jego powstania w ujściu Bugu do Jeziora Zegrzyńskiego. W tablicy 4.3 zestawiono dane o położeniu zatoru w poszczególnych dniach rejestracji obrazów, co pozwala obliczyć prędkość przyrastania zatoru. Jak można zauważyć prędkość przyrastania zatoru zwiększa się w górę rzeki, co można tłumaczyć faktem zmieniającej się geometrii koryta. W ujściowym odcinku koryto Bugu jest bardzo szerokie (przekształcone przez przekop), a powyżej km 5,0 powraca do geometrii typowej dla naturalnej rzeki. Z modelu hydrodynamicznego CCHE2D wynika, że prędkości średnie w pionie w odcinku ujściowym Bugu (km 0,0–1,0) są rzędu 0,1–0,2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,

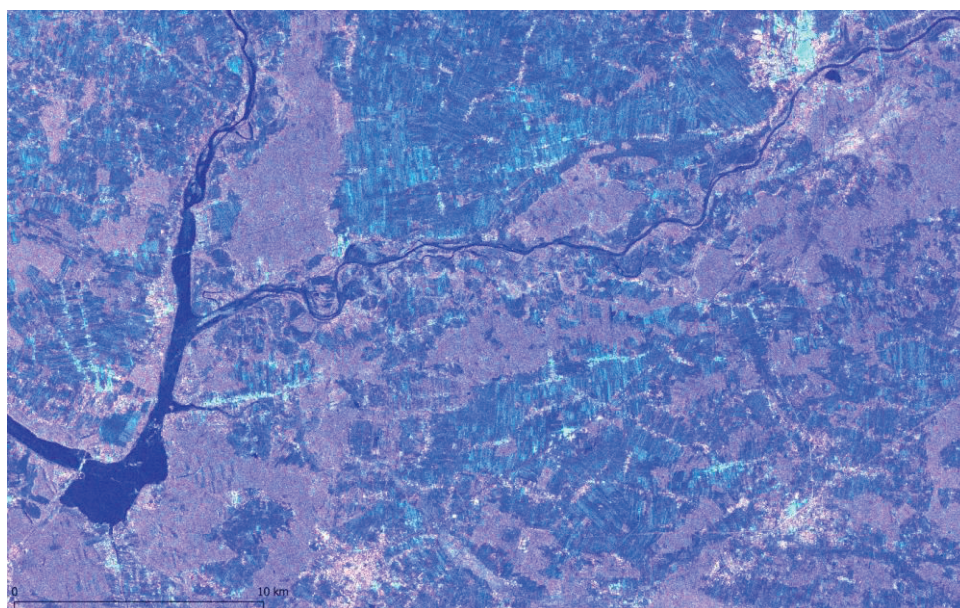
Tablica 4.3

Położenie zatoru śryżowego na Bugu w dniach 23-27 II 2018 r. i prędkość jego przyrostu

Table 4.3

Location of frazil ice jam on Bug river and velocity of growth in period 23-27 II 2018

Czas rejestracji obrazu	Położenie końca zatoru wg km Bugu [km]	Przyrost długości zatoru L [km]	Różnica czasu rejestracji obrazu t [h]	Prędkość przyrostu zatoru v [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]	Prędkość przyrostu zatoru v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
23 II 2018 16:23 24 II 2018 16:19	2,0-9,0	7	23,9	0,29	0,08
24 II 2018 16:19 26 II 2018 04:52	9,0-31,0	22	36,6	0,60	0,17
26 II 2018 04:52 27 II 2018 04:43	31,0-51,0	20	23,9	0,84	0,23

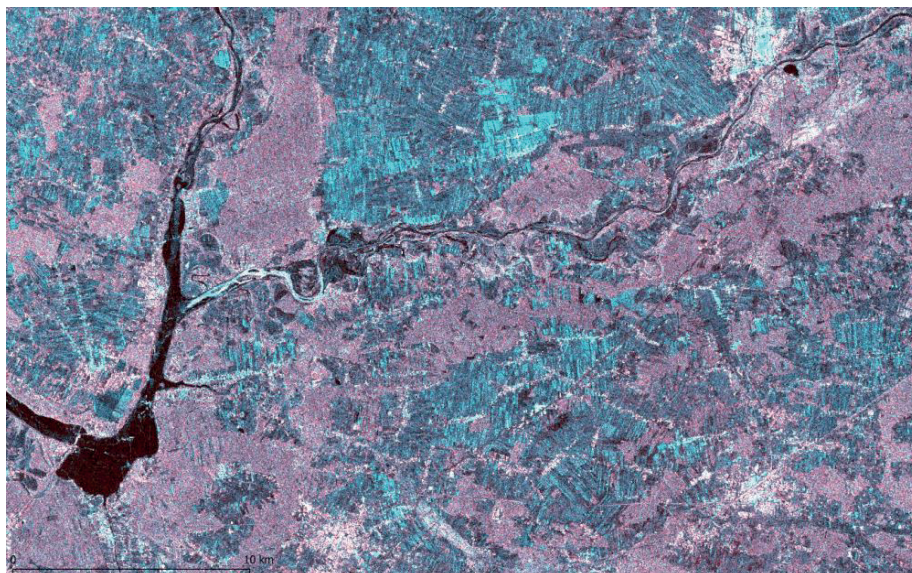


Rys. 4.30. Zator śryżowy na Bugu (km 0-2) widoczny na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH z dnia 23 II 2018 r. godz. 16:23

Fig. 4.30. Frazil ice jam on Bug river (km 0-2) at SAR Sentinel-1 GRDH image on 23 II 2018 16:23

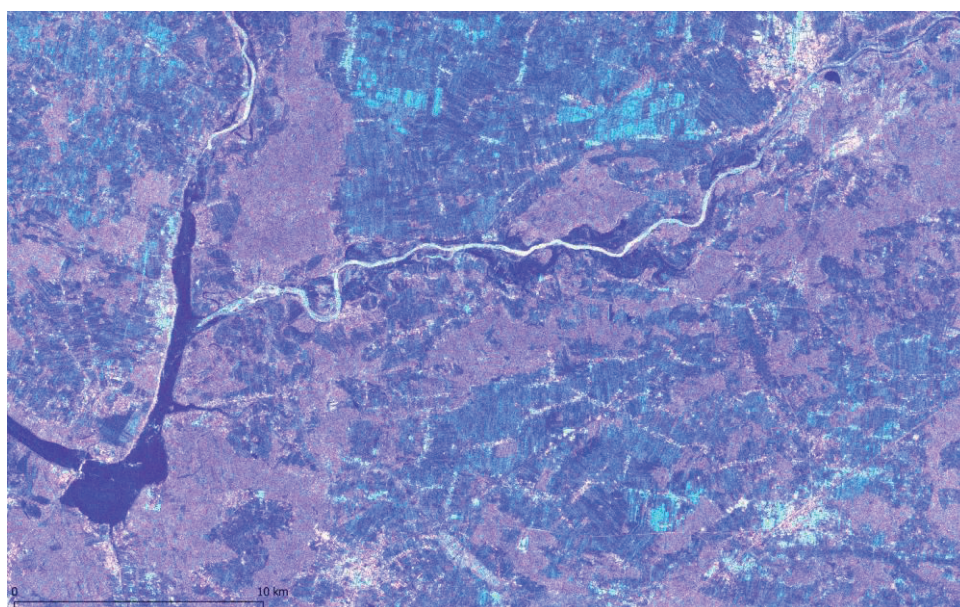
natomiast w zakolu Bugu (km 5,0–9,0) są to już prędkości typowe dla swobodnie płynącej rzeki 0,4–0,6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Podobne jak na Bugu tempo przyrastania pokrywy lodowej w wyniku zatrzymania spływu śryżu obserwowano na Wiśle powyżej Jeziora Włocławskiego



Rys. 4.31. Zator śryżowy na Bugu (km 0-9) widoczny na obrazie SAR Sentinel-1 z dnia 24 II 2018 r. godz. 16:19

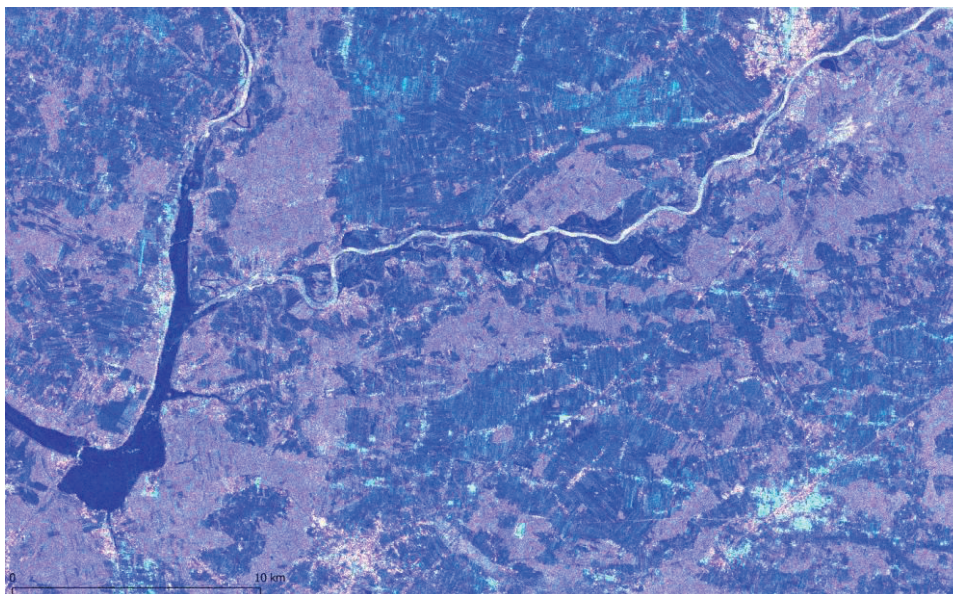
Fig. 4.31. Frazil ice jam on Bug river (km 0-9) at SAR Sentinel-1 image on 24 II 2018 16:19



Rys. 4.32. Zator śryżowy na Bugu w km 0-31 widoczny na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH z dnia 26 II 2018 r. godz. 04:52

Fig. 4.32. Frazil ice jam on Bug river (km 0-31) at SAR Sentinel-1 GRDH image on 26 II 2018 04:52

(Pawłowski, 2017). Było to $15\text{--}20\text{ km}\cdot 24\text{h}^{-1}$ ($0,6\text{--}0,8\text{ km}\cdot \text{h}^{-1}$), w zimie 2012 r., gdy średnia temperatura powietrza spadła do -15°C Największe tempo przyrostu pokrywy lodowej z lodu mobilnego sięgało $35\text{ km}\cdot 24\text{h}^{-1}$ na odcinku km od 675 do 651 i było obserwowane w zimie 2010 r. Natomiast w tym samym okresie prędkość przyrastania pokrywy lodowej przy ujściu Narwi wynosiła tylko $5\text{ km}\cdot 24\text{h}^{-1}$.



Rys. 4.33. Zator śryżowy na Bugu w km 0-51 widoczny na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH z dnia 27 II 2018 r. godz. 04:43

Fig. 4.33. Frazil ice jam on Bug river (km 0-51) at SAR Sentinel-1 GRDH image on 27 II 2018 04:43

Rozwój zatoru śryżowego powoduje spiętrzenie wody powyżej jego krańca, co zakłóca zależność $Q = f(H)$ przez zmianę spadku podłużnego w profilu wodowskazowym. Zobrazowanie SAR Sentinel z 24 II 2018 r. godz. 16:19 wskazuje na położenie końca zatoru w km 9,0, a więc bardzo blisko wodowskazu Popowo (km 9,5). Na rys. 4.34 pokazano przebieg spiętrzenia wody i szybki wzrost jej poziomu wywołany podpiętrzeniem o 70 cm w ciągu 24 godz. Wezbranie to nie było spowodowane wzrostem przepływu, bowiem na leżącym wyżej w km 34,5 posterunku wodowskazowym Wyszaków, nie objętym zlodzeniem, stany wody nie uległy zmianie, a nawet nieznacznie malały (rys. 4.35). Początkowe spiętrzenie wody uległo obniżeniu w ciągu następnej doby w wyniku rozbudowy utworzonej ze śryżu pokrywy lodowej w górę rzeki.

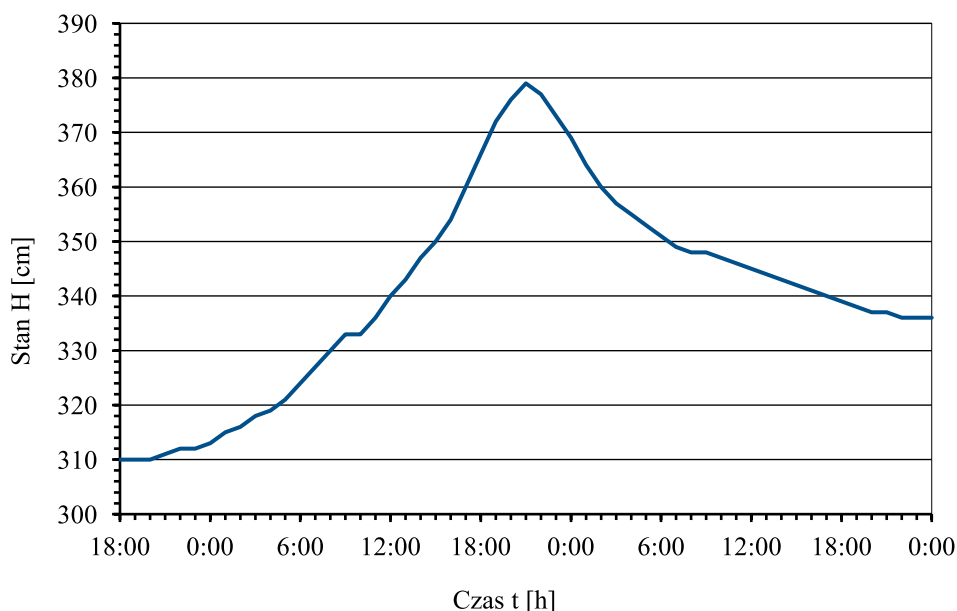
W profilu Popowo na Bugu w kolejnych dniach gdy ustabilizował się przepływ pod pokrywą lodową stany wody nie ulegały zmianie (rys. 4.36). W wyniku napływu śryżu przesuwający się w górę rzeki kraniec zatoru osiągnął km 31,0, co jest widoczne na obrazie SAR Sentinel-1 z dnia 26 II 2018 r. godz. 04:52 (rys. 4.32). W zasięgu zatoru śryżowego znalazł się posterunek wodowskazowy Wyszaków położony w km 34,5, a w przebiegu stanów wody na wodowskazie w tym dniu zanotowano gwałtowny przyrost poziomu wody o 100 cm w ciągu 12 godz. (rys. 4.37).

Przyrost stanów wody w wyniku spiętrzenia na końcu zatoru zaczyna zanikać gdy krawędź pokrywy lodowej osiągnie przekrój wodowskazowy. Stan wody zaczyna wtedy opadać w wyniku wygładzania dolnej powierzchni lodu przez płynącą wodę (Beltaos i in. 1990).

Obrazy SAR Sentinel-1 przy obecnej rozdzielczości czasowej 1–2 dni dostarczają cennych danych o przebiegu tak dynamicznych procesów jak formowanie się zatorów na rzekach i rozbudowa pokrywy lodowej z lodu mobilnego. Wykrywanie takich form zlodzenia na rzekach jest ułatwione na obrazach otrzymywanych z produktu GRDH, ponieważ spiętrzone krążki śryżowe zbite w pokrywą lodową dobrze odbijają fale radarowe, co przekłada się na największe wartości rozproszenia wstecznego rejestrowane na obrazach zwłaszcza w polaryzacji VV. Zatory śryżowe są więc

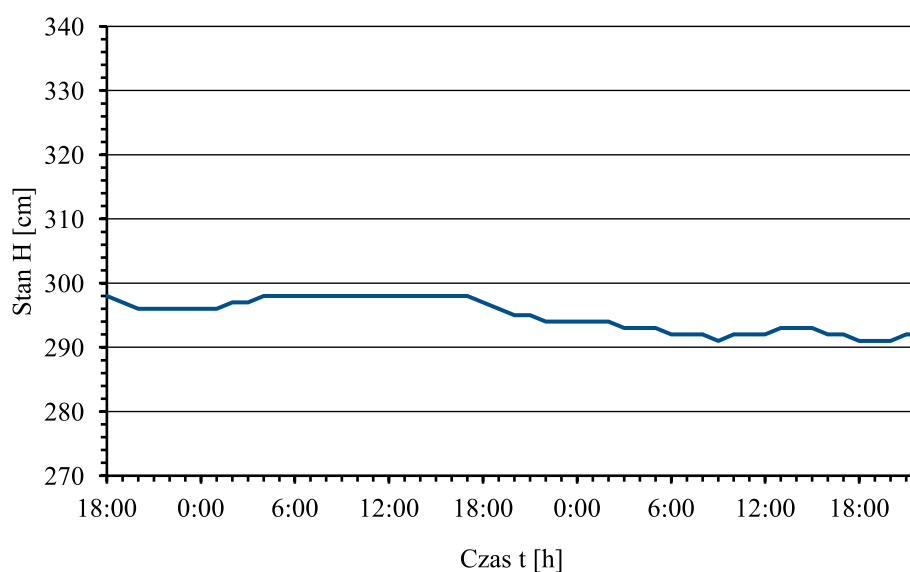
łatwe do identyfikacji na obrazach uzyskanych jako kompozycja barwna, odwzorowują się bowiem jako biała wstęga.

Bardzo ważnym okresem w przebiegu zlodzenia jest zanik pokrywy lodowej, co dotyczy szczególnie sztucznych zbiorników wodnych, przy stopniach wodnych. Pokrywa lodowa uformowana w jeziornej części zbiornika nie ulega szybkiemu topnieniu, a jeśli w końcu ulegnie dezintegracji to kra musi przepłynąć przez jazy stopnia wodnego.



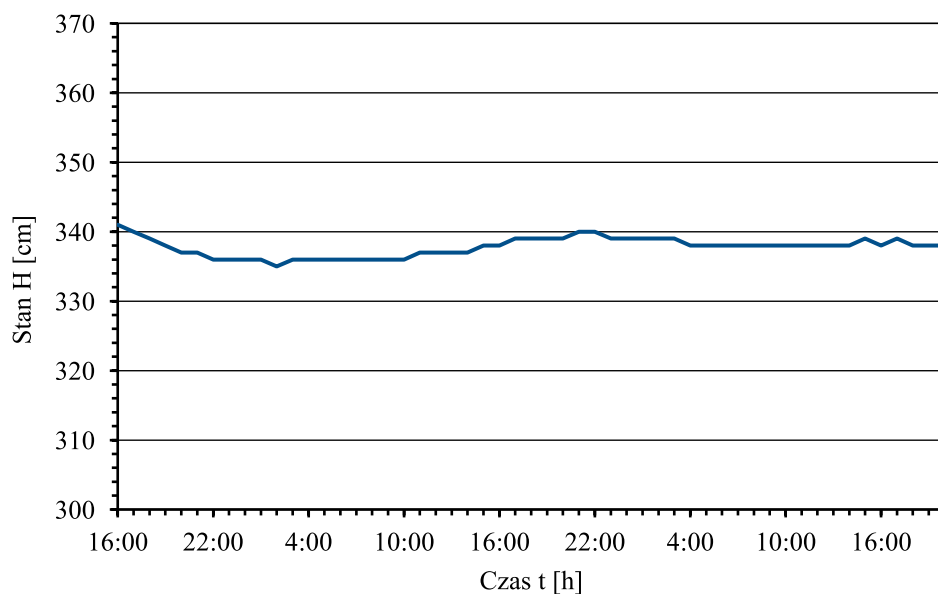
Rys. 4.34. Wzrost stanów wody w posterunku Popowo na Bugu (km 9,5) w dniu 24 II 2018 r. spowodowany zatorem śryżowym, którego kraniec zatrzymał się w czasie kulminacji na km 9 biegu rzeki

Fig. 4.34. Popowo gauge on Bug river (km 9,5) increase of water stage on 24 II 2018 cused by the fragile ice jam extending to km 9 of the river course

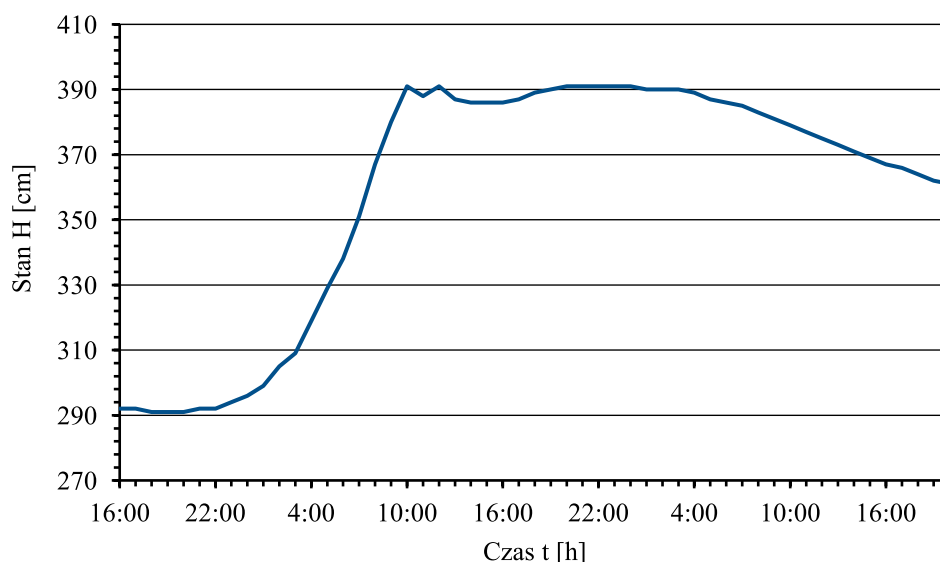


Rys. 4.35. Przebieg stanów wody na wodowskaziu Wyszków (km 34,5) na Bugu w warunkach braku zlodzenia i równoczesnym spiętrzeniu wody przez zator śryżowy w km 9 w dniu 24 II 2018 r.

Fig. 4.35. Wyszków gauge on Bug river (km 34,5) water stages on 24 II 2018 at the free water flow



Rys. 4.36. Przebieg stanów wody w posterunku Popowo na Bugu (km 9,5) w dniach 26-27 II 2018 r.
Fig. 4.36. Water stages at Popowo gauge on Burg River (km 9,5) measured in the period 26-27 II 2018

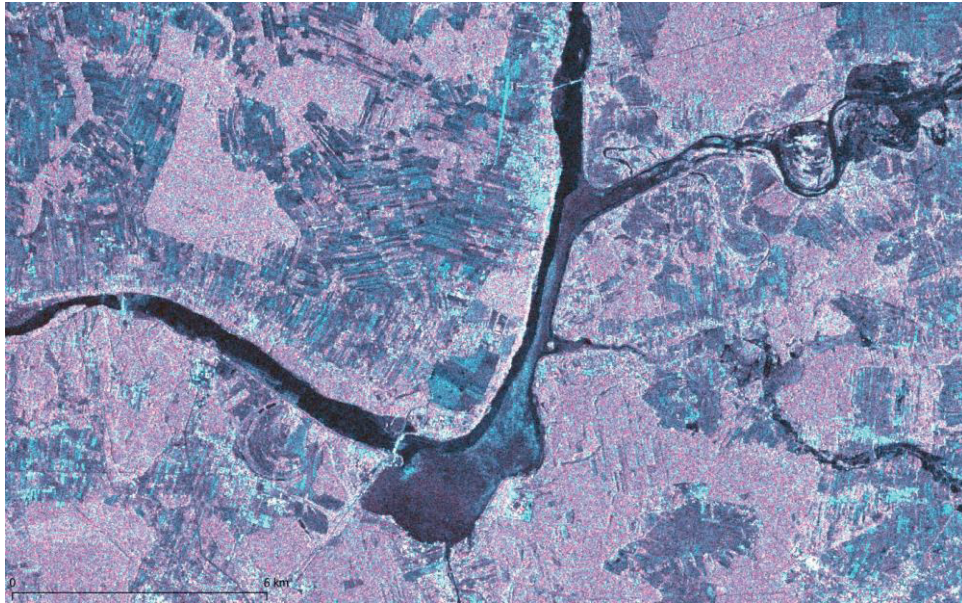


Rys. 4.37. Przebieg stanów wody na posterunku wodowskazowym Wyszaków na Bugu (km 34,5) w dniach 26-27 II 2018 r. w warunkach spiętrzenia wody przez zator śrężowy w km 31,0
Fig. 4.37. Water stages at Wyszaków gauge on Burg River (km 34,5) measured in the period 26-27 II 2018 during influence of frazil ice at km 31,0

W przypadku Jeziora Zegrzyńskiego topnienie pokrywy lodowej w jeziornej części zbiornika zachodzi najpierw w dawnym nurcie Narwi (rys. 4.38), następnie znika pokrywa lodowa na mniejszym plosie, a w ostatniej kolejności topi się lód zalegający w dużym plosie. Powodem wcześniejszego topnienia lodu w dawnym korycie Narwi jest wyższa temperatura wody płynącej z góry rzeki, ogrzanej przez zrzut wód chłodniczych w elektrowni Ostrołęka.

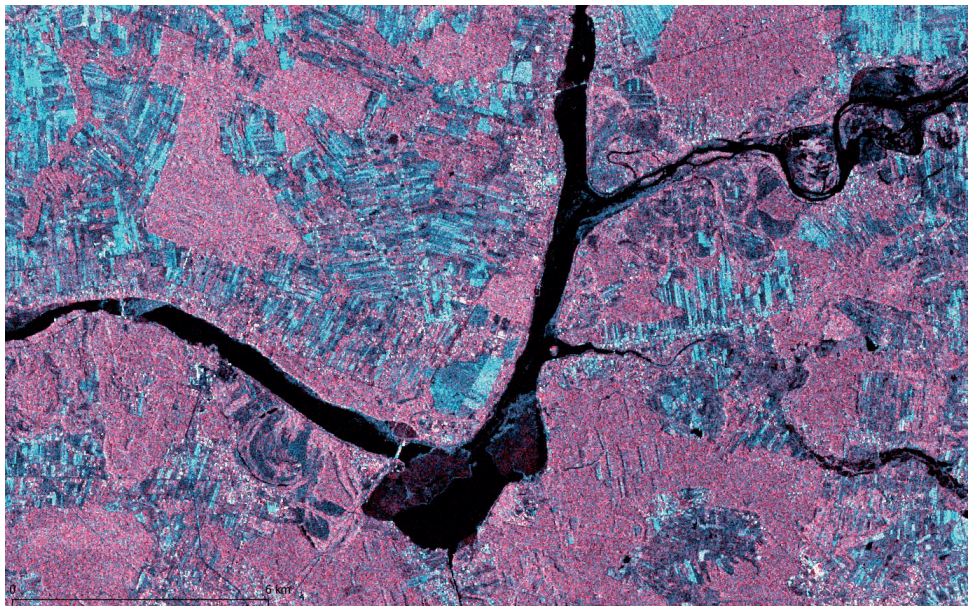
Gdy topnieje lód w jeziornej część zbiornika, ulega on odspojeniu od brzegów, dzięki czemu może swobodnie przemieszczać się po akwenie. Dobrym przykładem takiego przebiegu zdarzeń jest zanik stałej pokrywy lodowej w głównym plosie zbiornika w dniu 31 I 2018 r. Na Jeziorze Zegrzyńskim wystąpił wówczas wiatr o sile

$5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ z kierunku S, tafla lodu z dużego plosa pękła na dwie części i została zdryfowana w stronę dawnego koryta Narwi. Warto zwrócić uwagę, że na obrazie SAR Sentinel-1 lód w fazie rozpadu pokrywy lodowej jest dobrze odróżnialny od powierzchni wody. W fazie topnienia ze względu na zmianę struktury lodu jeziornego i pojawienia się w nim pęcherzyków powietrza, zwiększa się zdolności do odbicia rozproszonego fali radarowej. To umożliwia odróżnienie powierzchni topniejącej tafli lodu od powierzchni odkrytej wody (rys. 4.38), co było bardzo utrudnione w początkowej fazie zlodzenia.



Rys. 4.38. Zanik lodu na Jeziorze Zegrzyńskim widoczny na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH z dnia 26 II 2017 r., dawne koryto Narwi jest wolne od lodu

Fig. 4.38. Ice break-up on Zegrze Reservoir at SAR Sentinel-1 GRDH image on 26 II 2017, Narew old channel is free from ice



Rys. 4.39. Zanik lodu na Jeziorze Zegrzyńskim widoczny na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH z dnia 31 I 2018 r.

Fig. 4.39. Ice break-up on Zegrze Reservoir at SAR Sentinel-1 GRDH image on 31 I 2018

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 spiętrzonej pokrywy lodowej, zbudowanej ze stłoczonej formy lodu mobilnego – śryzu (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 obrazowaniach 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 zobrazowań 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 Wyszaków 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. Ciepłe 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 Pułtusza 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/>).

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