

4. ZJAWISKA LODOWE NA JEZIORZE ZEGRZYŃSKIM NA OBRAZACH SATELITARNYCH SENTINEL-1

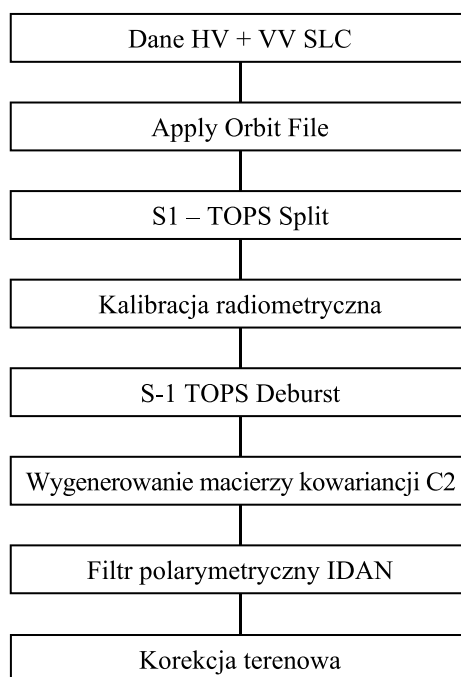
W pracy wykorzystane zostały obrazy z dwu satelitów Sentinel-1, oznaczonych literami A i B. Pierwszy etap pracy polegał na pozyskaniu z archiwum The Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>) scen z satelitów Sentinel-1A i Sentinel-1 B, zarejestrowanych w paśmie C, pozyskaniu komunikatu lodowego RZGW z okresu 16–19 I 2018 r. dla Jeziora Zegrzyńskiego, a także danych z post-runków wodowskazowych IMGW.

Do analizy wykorzystano produkty SLC oraz GRDH zapisane w trybie IW (ang. *Interferometric Wide swath mode*). Każde z pozyskanych zobrazowań zostało poddane wstępnemu przetwarzaniu. Proces ten w przypadku produktów SLC i GRDH różni się od siebie, bowiem produkty SLC umożliwiają przetworzenie danych do macierzy kowariancji 2x2 [C2]. Dodatkowo produkty SLC zostały przetworzone polarymetrycznie za pomocą filtra IDAN. Do wstępnego przetwarzania danych zastosowano ogólnodostępny program SNAP dostarczony przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA), powszechnie stosowany w teledetekcji radarowej.

Schemat wstępnego przetwarzania produktów SLC przedstawiono na rys. 4.1. W pierwszej kolejności dla pobranego produktu SLC zaktualizowano informację dotyczącą wektora orbity. Następnie wytypowano z podzielonego obrazu na podsieci IW1, IW2, IW3 tę część zobrazowania, na którym znajduje się Jezioro Zegrzyńskie. Umożliwiło to przyspieszenie dalszych etapów przetwarzania obrazów. W dalszej kolejności zastosowano kalibrację radiometryczną, w celu przekonwertowania wartości cyfrowych pikseli na radiometrycznie kalibrowane rozproszenie wsteczne. Kolejnym krokiem było zastosowanie filtra S1 TOPS Deburst, mające na celu wyeliminowanie martwych przestrzeni pikseli. Kolejnym krokiem było wygenerowanie macierzy kowariancji C2 oraz nałożenie filtra polarymetrycznego IDAN, aby zredukować wpływ szumu cętkowego. Ostatnim krokiem było zastosowanie korekcji geometrycznej, mającej na celu zredukowanie zniekształceń geometrycznych obrazu, przybliżając jego rzeczywisty obraz.

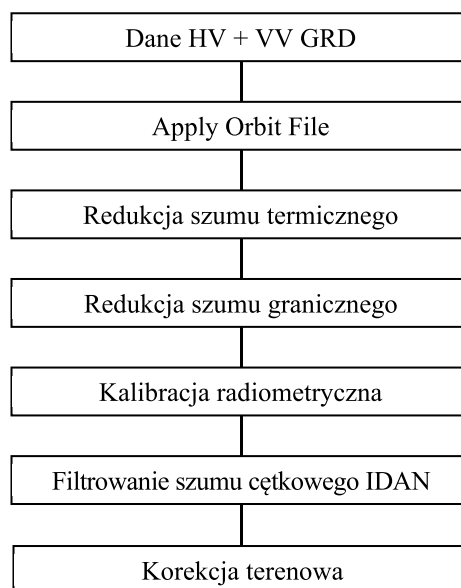
Do celów porównawczych ze zobrazowaniami SLC zastosowano również zobrazowania GRDH, których proces przetwarzania różni się, biorąc pod uwagę brak możliwości wygenerowania macierzy kowariancji. Bazując na współczynniku rozproszenia wstecznego, zastosowano filtrowanie szumu cętkowego (ang. *speckle filtering*). Oprócz pozyskania informacji o orbicie, kalibracji radiometrycznej i geometrycznej, w tym przypadku zastosowano redukcję szumu termicznego (ang. *thermal noise removal*), która zmniejsza efekty szumu w teksturze obrazu, a także normalizuje sygnał rozproszenia wstecznego w całej scenie obrazu Sentinel-1 (Flipponi, 2019). Następnie zastosowano redukcję szumu granicznego (ang. *border noise removal*) w celu redukcji szumu o niskiej intensywności oraz błędnej informacji występującej na krawędziach sceny. Oprócz tego wykorzystano filtrowanie szumu cętkowego IDAN, które jest rekomendowane w procesie usuwania błędnych wartości pikseli na obrazach. Ostatnim etapem była korekcja geometryczna uwzględniająca ukształtowanie terenu. Schemat przetwarzania produktu GRDH został przedstawiony na rys. 4.2.

Po wstępnym przetworzeniu zobrazowań Sentinel-1 SAR przystąpiono do wykonania maski zakrywającej wszystkie inne elementy pokrycia terenu z wyjątkiem wód Jeziora Zegrzyńskiego. Następnie wytypowano klasy zjawisk lodowych, które zostały zarejestrowane w dniach 16, 18 i 19 I 2018 r. i zapisane w komunikacie lodowym RZGW o występowaniu zjawisk lodowych na Narwi z dnia 06 II 2018 r.



Rys. 4.1. Schemat wstępnego przetwarzania produktów Sentinel-1 SLC

Fig. 4.1. Flow chart of initial processing of Sentinel-1 SLC products



Rys. 4.2. Schemat wstępnego przetwarzania produktów Sentinel-1 GRDH

Rys. 4.2. Flow chart of initial processing of Sentinel-1 GRDH products

Zdecydowano się na ustanowienie tych samych klas co w raporcie lodowym RZGW, ze względu na ułatwioną późniejszą interpretację wyników oraz możliwością porównania występowania zjawisk lodowych na wytypowanym odcinku rzeki, wraz z nałożonym na niego kilometrażem.

Wytypowane klasy przedstawiają się następująco:

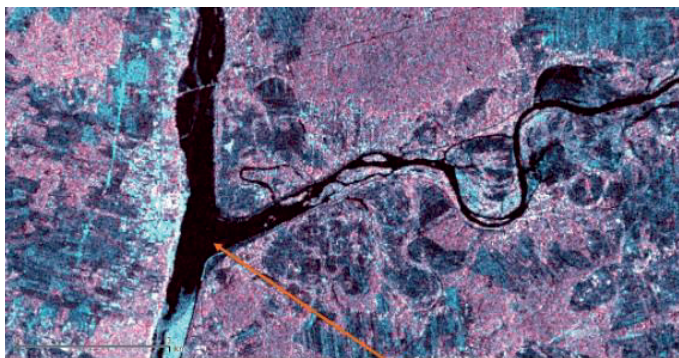
- rzeka wolna (FW – ang. *Free Water*),
- lód brzegowy (SI – ang. *Shore Ice*),

- śryż (FI – ang. *Frazil Ice*),
- pokrywa lodowa (IC – ang. *Ice Cover*),
- spiętrzona pokrywa lodowa, zbudowana ze stłoczonych form lodu mobilnego (CI – ang. *Consolidated Ice*).

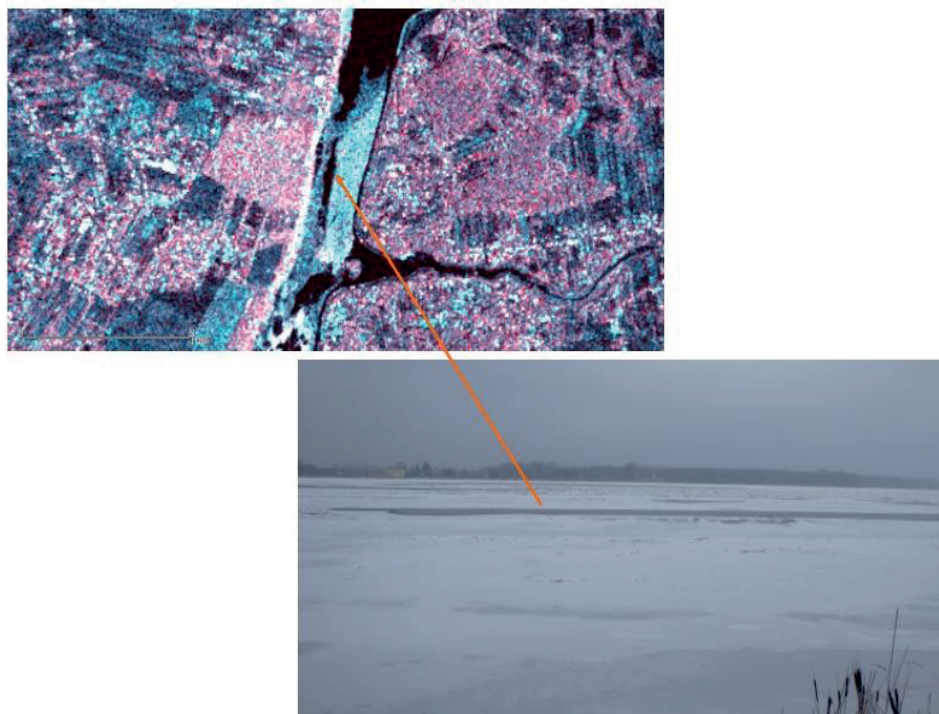
Po wyznaczeniu klas form lodu rzeczno przystąpiono do wizualnej oceny możliwości zlokalizowania poszczególnych zjawisk lodowych i ich zasięgu, a także na podstawie tej oceny, posiłkując się informacjami zawartymi w komunikacie lodowym, zlokalizowano typy zlodzenia oraz wygenerowano wartości współczynnika rozproszenia wstecznego dla kanałów VH i VV oraz macierzy kowariancji 2x2 [C2].

Występowanie zjawisk lodowych oraz ich przebieg na Jeziorze Zegrzyńskim określono na podstawie wyników analiz wizualnych zobrazowań radarowych w kompozycji barwnej RGB. Obrazy uzyskano jako kompozycję barwną RGB z obrazu SAR Sentinel-1, produkt GRDH, przyjmując następujące składowe barw: Red – kanał VH, Green – kanał VV, Blue – kanał VV przekształcony do wartości zapisanych w skali dB. Ocena skoncentrowana jest przede wszystkim na stopniu zachowania barw kompozycyjnych, a także ziarnistości, charakterystycznej dla rozproszenia wstecznego towarzyszącego różnym formom zjawisk lodowych.

W celu ułatwienia interpretacji w sezonie zimowym 2018 r. dokonano także obserwacji naziemnych z dokumentacją fotograficzną zbieżną w czasie lub nieznacznie przesuniętą w stosunku do daty rejestracji obrazów SAR przez satelitę Sentinel-1 (rys. 4.3–4.10). Pozwoliło to powiązać wygląd charakterystycznych rodzajów pokrywy lodowej z ich reprezentacją w postaci jasności i tekstury pikseli na obrazach RGB.

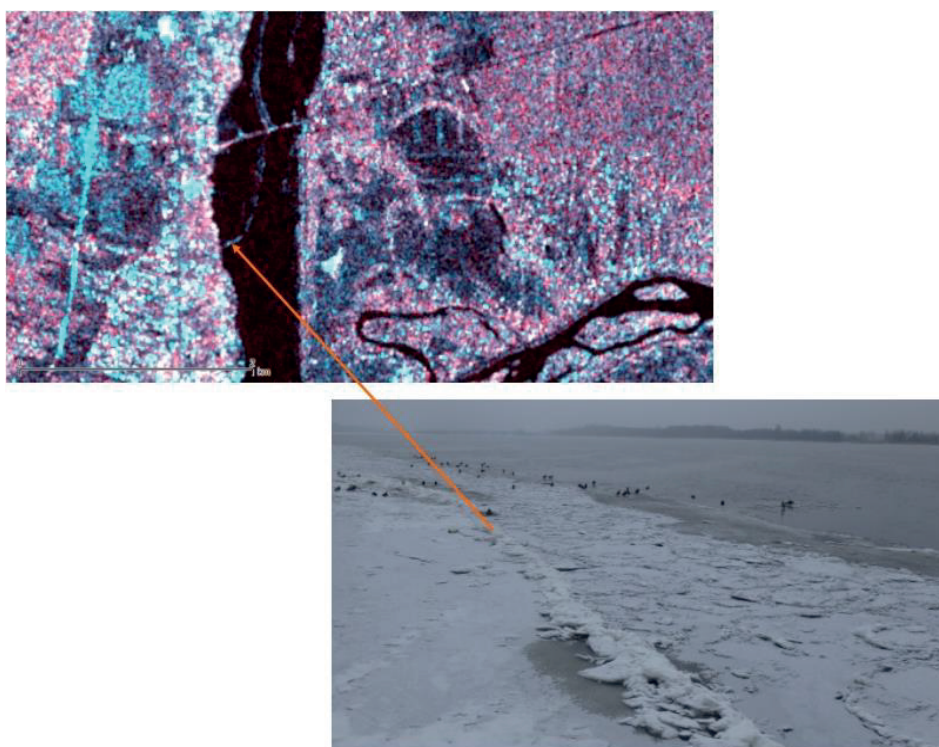


Rys. 4.3. Rzeka wolna od lodu – ujście Bugu do Jeziora Zegrzyńskiego (km 38) 14 II 2018 r. na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH oraz zdjęcie naziemne wykonane w Serocku – widok w stronę ujścia Bugu
 Fig. 4.3. Free water of Zegrze Reservoir at Bug river mouth (km 38) 14 II 2018 on SAR Sentinel-1 GRDH image, and ground photo taken in Serock – view toward Bug river



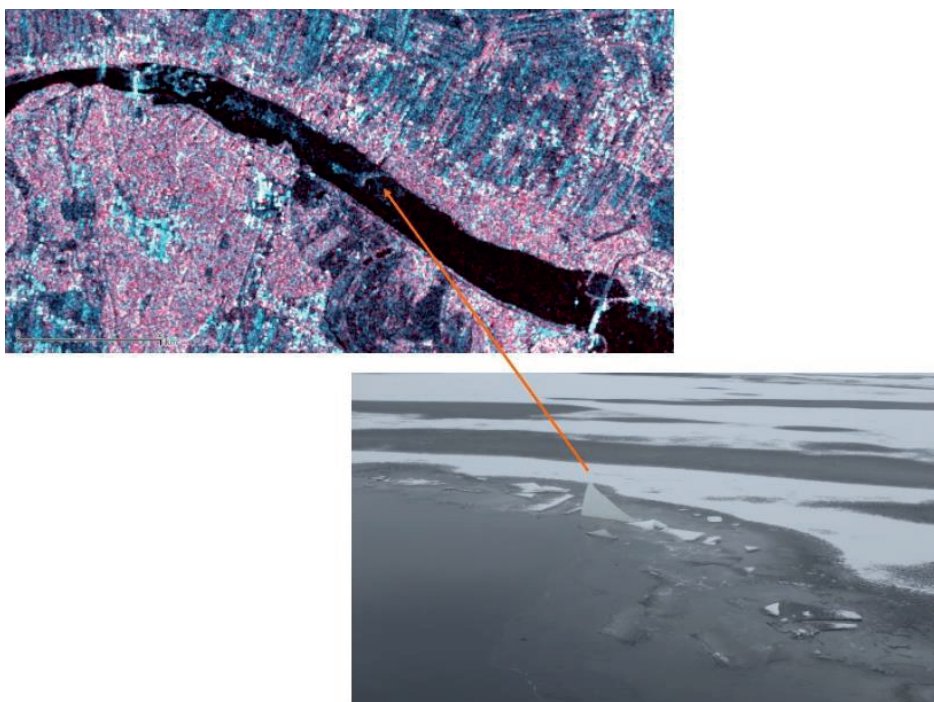
Rys. 4.4. Przetaina w pokrywie lodowej na Jeziorze Zegrzyńskim w Jadwisinie (km 34) 14 II 2018 r. na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH oraz na zdjęciu naziemnym

Fig. 4.4. Polynya in ice cover of Zegrze Reservoir near Jadwisin village (km 34) 14 II 2018 on SAR Sentinel-1 GRDH image and on ground photo



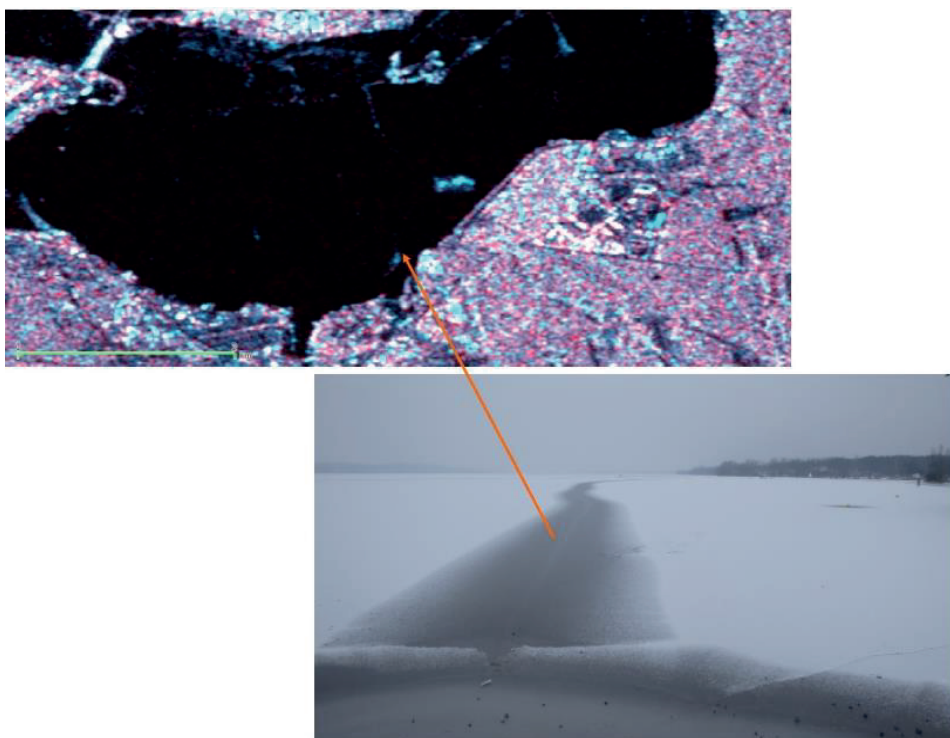
Rys. 4.5. Krawędź lodu brzegowego na Jeziorze Zegrzyńskim w Serocku (km 39) 14 II 2018 r. na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH oraz zdjęcie naziemne obrazujące spiętrzenie krążków śryżowych na powierzchni lodu brzegowego

Fig. 4.5. Edge of shore ice on Zegrze Reservoir in Serock (km 39) 14 II 2018 on SAR Sentinel-1 GRDH image and ground photo showing pancake ice prism on the surface of shore ice



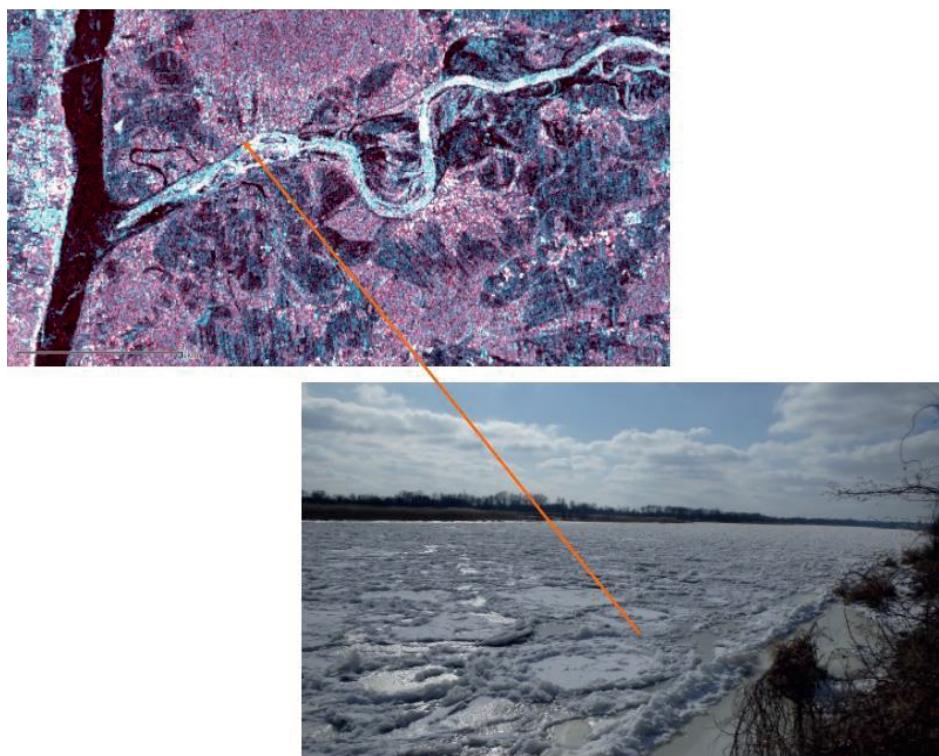
Rys. 4.6. Krawędź lodu brzegowego na Jeziorze Zegrzyńskim w Jachrance (km 25) 14 II 2018 r. na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH oraz zdjęcie naziemne obrazujące spiętrzenie kry na krawędzi stałej pokrywy lodowej

Fig. 4.6. Edge of shore ice on Zegrze Reservoir near Jachranka village (km 25) 14 II 2018 at SAR Sentinel-1 GRDH image and on ground photo showing prism of ice floes at the surface of solid ice cover



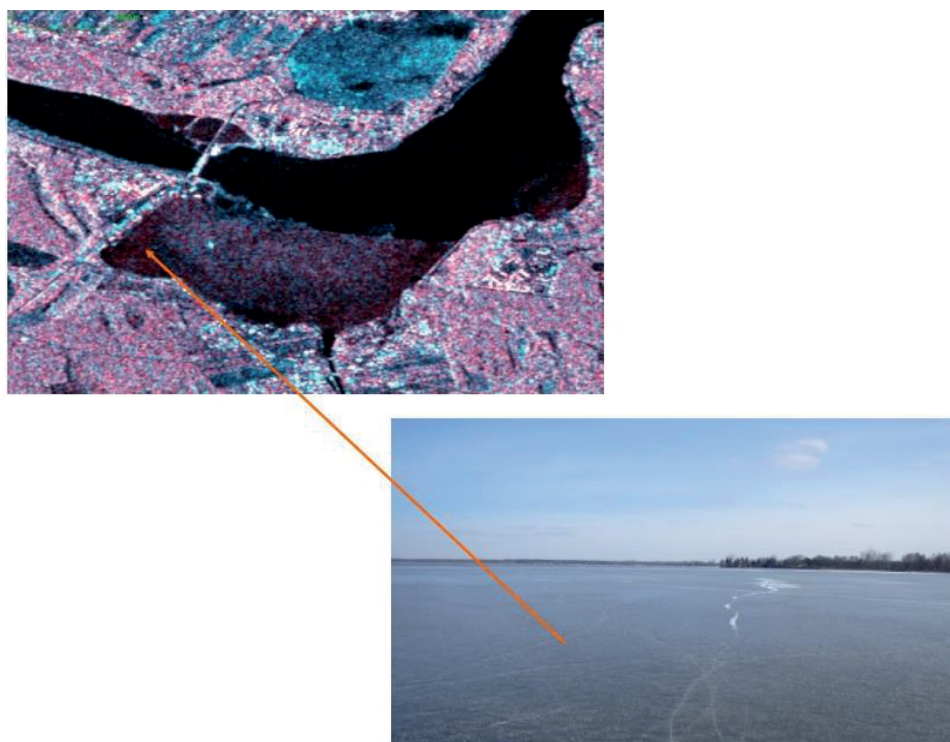
Rys. 4.7. Stała pokrywa lodowa z liniami pęknięć na dużym płosy Jeziora Zegrzyńskiego (km 30) 11 II 2018 r. na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH oraz zdjęcie naziemne

Fig. 4.7. Ice cover with lines of fractures across large basin of Zegrze Reservoir (km 30) 11 II 2018 on SAR Sentinel-1 GRDH image and on ground photo



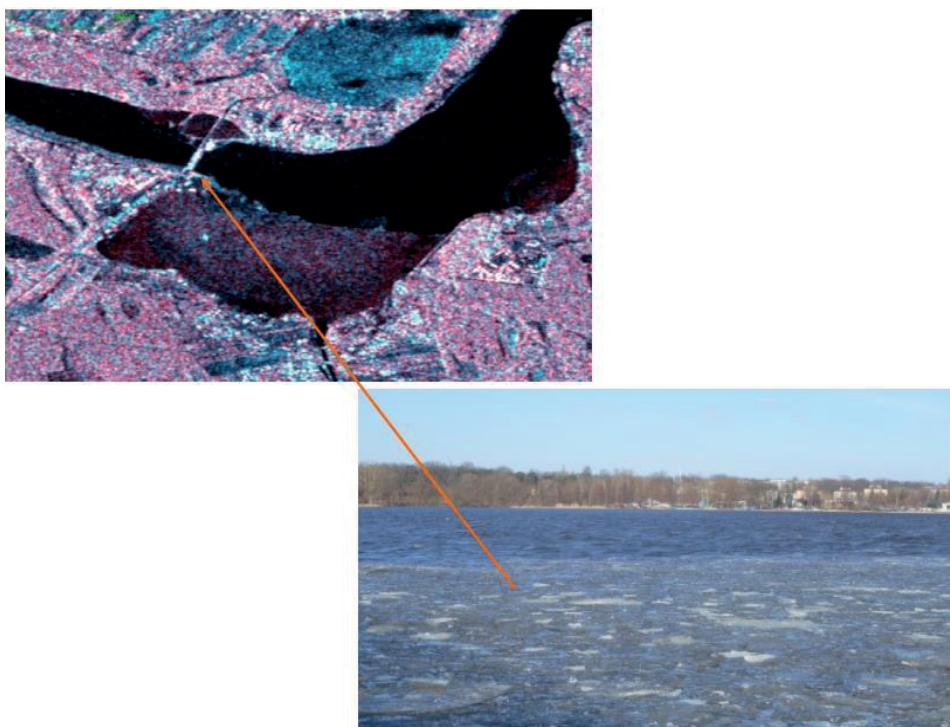
Rys. 4.8. Stała pokrywa lodowa uformowana z krążków śryżowych w ujściu Bugu koło Kani Polskiej (km 3) 26 II 2018 r. na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH oraz zdjęcie naziemne 25 II 2018 r.

Fig. 4.8. Ice cover made of pancake jam at mouth of Bug river near Kania Polska village (km 3) 26 II 2018 on SAR Sentinel-1 GRDH image and on ground photo 25 II 2018



Rys. 4.9. Zanik pokrywy lodowej w głównym plosie Jeziora Zegrzyńskiego (km 29) 19 III 2018 r. na obrazie SAR Sentinel-1 GDR oraz zdjęcie naziemne 17 III 2018 r.

Fig. 4.9. Break-up of ice cover in lacustrine basin of Zegrze Reservoir (km 29) 19 III 2018 on SAR Sentinel-1 GRDH image and on ground photo 17 III 2018



Rys. 4.10. Lewy brzeg Jeziora Zegrzyńskiego w rejonie mostu w Zegrzu Południowym (km 29) 19 III 2018 r. – spływ kry powstałej z rozpadu stałej pokrywy lodowej w dużym plosu na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH oraz zdjęcie naziemne 17 III 2018 r.

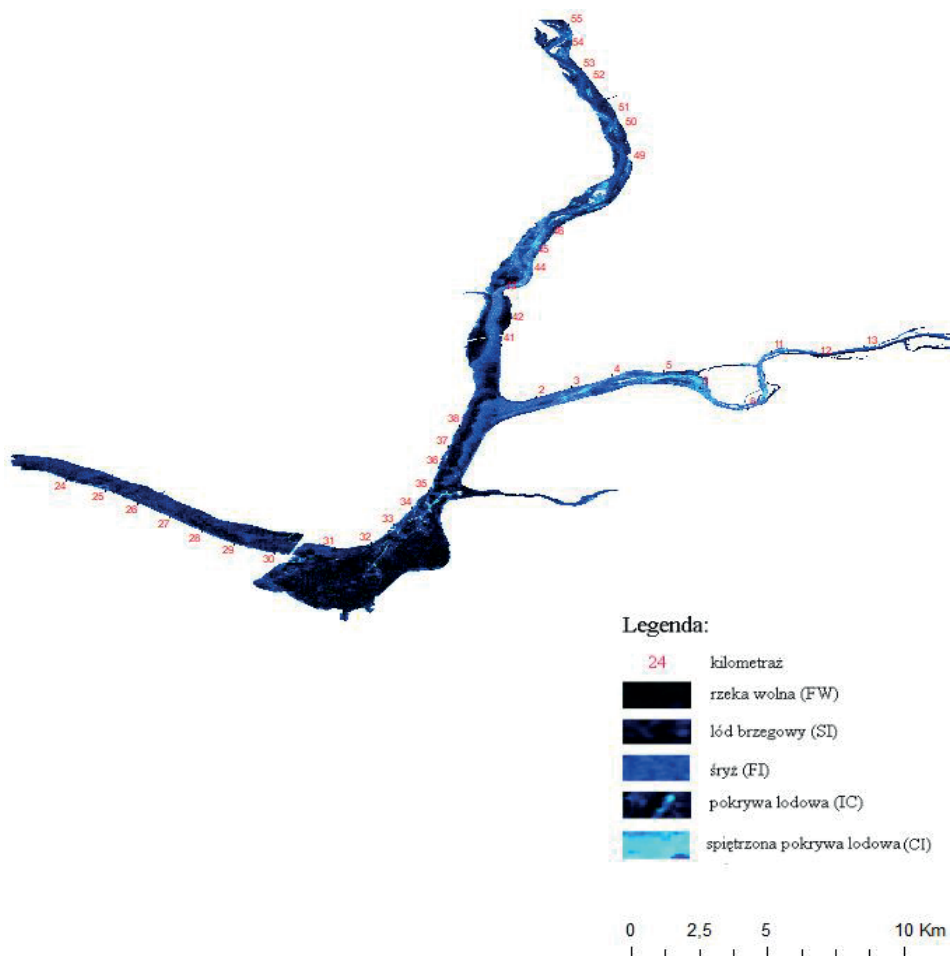
Fig. 4.10. Ice floes run along left bank of Zegrze Reservoir near bridge in Zegrze Południowe (km 29) 19 III 2018 on SAR Sentinel-1 GRDH image and on ground photo 17 III 2018

Do analizy przebiegu zjawisk lodowych na Jeziorze Zegrzyńskim za pomocą obrazów SAR Sentinel-1 z produktu GRDH wykonano trzy mapy obrazujące sytuację lodową w dniach 16, 18 i 19 I 2018 r. W interpretacji obrazów dodatkowym pomocniczym źródłem informacji był komunikat występowania zjawisk lodowych na Narwi z dnia 6 II 2018 r., udostępniony przez RZGW Warszawa.

Na rys. 4.11 pokazano zjawiska lodowe na Jeziorze Zegrzyńskim z dnia 16 I 2018 r. zarejestrowane na obrazie Sentinel-1 w produkcie GRDH. Jest to początkowa faza zjawisk lodowych na Jeziorze Zegrzyńskim, a ich różne formy pokazano w powiększeniu obrazów na rys. 4.12–4.14.

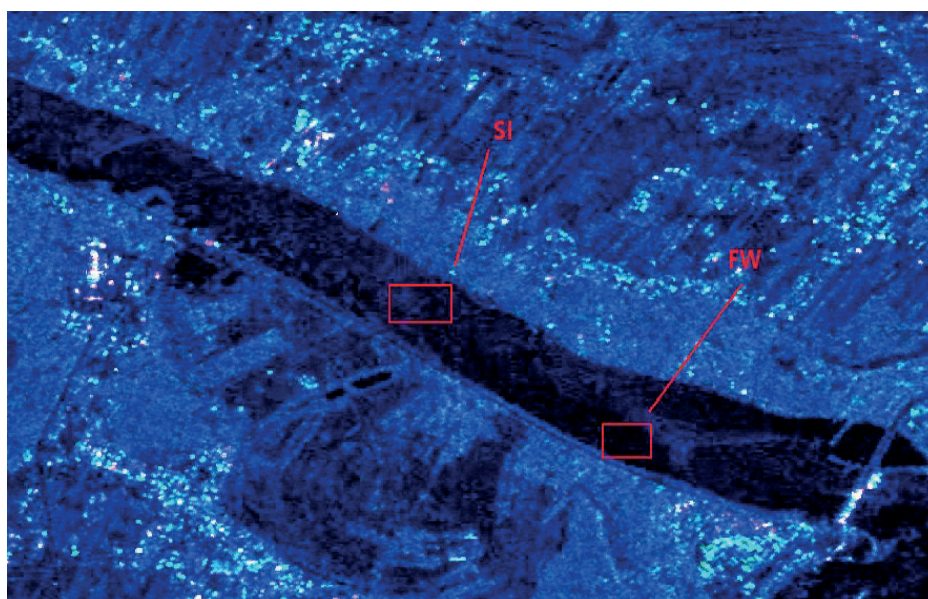
W dniu 16 I 2018 r. na Jeziorze Zegrzyńskim obraz SAR z Sentinela-1 zarejestrował rozproszenie wsteczne charakterystyczne dla kilku typów pokrywy lodowej. Między stopniem wodnym Dębe a Zegrzem Południowym widoczny jest lód brzegowy i fragment rzeki wolnej (rys. 4.12). Na dużym i małym plosu (km 31,0–35,0) uformowała się gładka nowa pokrywa lodowa z charakterystycznymi długimi liniami pęknięć lodu widocznymi jako cienkie, białe linie (rys. 4.13). Od km 35,0–55,0 Narwi obraz SAR Sentinel-1 zarejestrował rozproszenie wsteczne charakterystyczne dla tworzącego się pasa sryżu z towarzyszącym mu lodem brzegowym. Układ strumienia sryżu nawiązuje do przepływu Narwi, wskazując na położenie nurtu.

Na Bugu w odcinku km 0,0–11,0 oprócz pokrywy sryżowej na obrazie SAR Sentinel-1 można zauważyć fragmenty charakteryzujące się intensywnym rozproszeniem wstecznym, świadczącym o powstaniu spiętrzenia lodu (rys. 4.14). Ten odcinek Bugu jest nieuregulowany charakteryzuje się dużą krętością, zmiennością szerokości i występowaniem wysp.



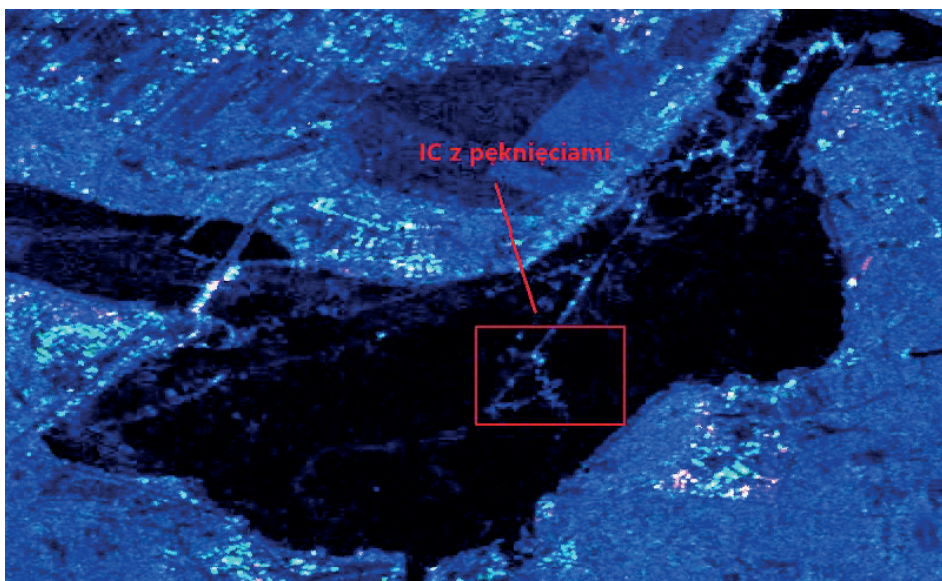
Rys. 4.11. Sytuacja lodowa na Jeziorze Zegrzyńskim na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH z dnia 16 I 2018 r.

Fig. 4.11. Ice situation of Zegrze Reservoir on SAR Sentinel-1 GRDH 16 I 2018 image



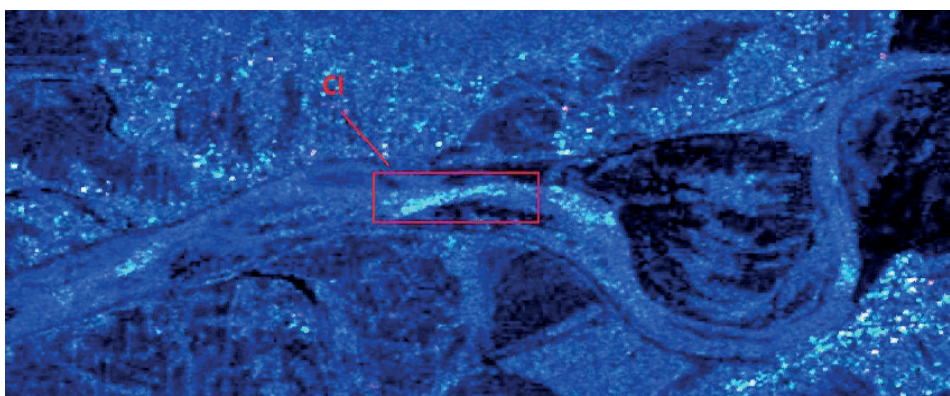
Rys. 4.12. Sytuacja lodowa na Jeziorze Zegrzyńskim (km 21-29) na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH 16 I 2018 r.: FW – rzeka wolna, SI – lód brzegowy

Fig. 4.12. Ice situation of Zegrze Reservoir (km 21-29) on SAR Sentinel-1 GRDH 16 I 2018 image: FW – free water, SI – shore ice



Rys. 4.13. Sytuacja lodowa na Jeziorze Zegrzyńskim (duże i małe plosy) na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH 16 I 2018 r. : IC – pokrywa lodowa

Fig. 4.13. Ice situation of Zegrze Reservoir (main and small basin) on 16 I 2018 – SAR Sentinel-1 GRDH image: IC – ice cover



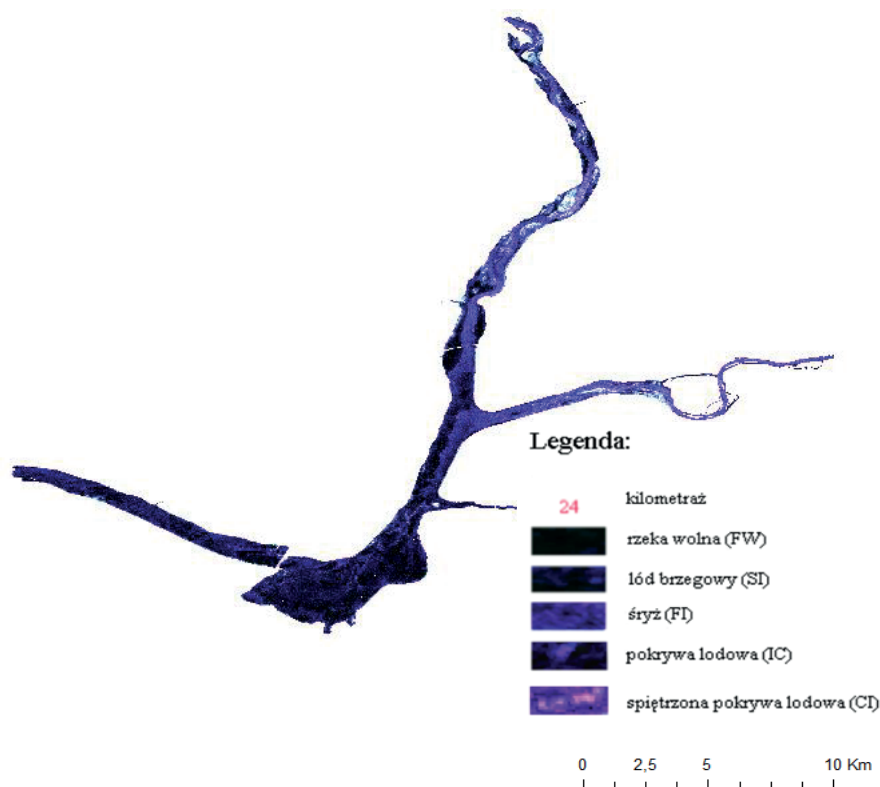
Rys. 4.14. Sytuacja lodowa na Bugu (km 3–12) na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH 16 I 2018 r., CI – spiętrzona pokrywa lodowa

Fig. 4.14. Ice situation on Bug river (km 3–12) SAR Sentinel-1 GRDH image 16 I 2018: CI – consolidated ice

W dniu 18 I 2018 r. w dalszym ciągu na Jeziorze Zegrzyńskim występowały zjawiska lodowe o podobnej charakterystyce zlodzenia jak w dniu 16 I 2018 r. (rys. 4.15).

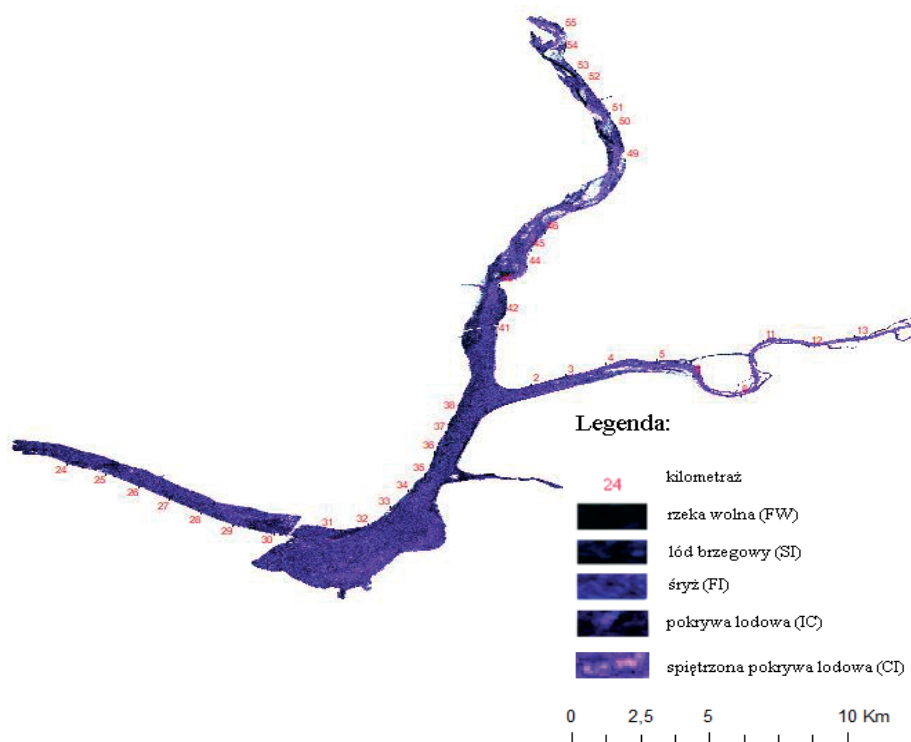
Całkowicie odmienny obraz uzyskano w dniu 19 I 2018 r., gdyż na głównej części Jeziora Zegrzyńskiego został zarejestrowany sygnał przedstawiający pokrywę lodową charakteryzującą się większym rozproszeniem i ziarnistością, co znacznie utrudnia interpretację form pokrywy lodowej (rys. 4.16).

W analizie wykorzystano dane archiwalne IMGW o warunkach pogodowych ze stacji synoptycznej w Legionowie, dotyczące średniej temperatury dobowej powietrza i opadu. W dniu 18 I 2018 r. nastąpiło gwałtowne ocieplenie (rys. 4.17), a dodatkowo zarejestrowano średni opad dobowy o wysokości 8,2 mm.



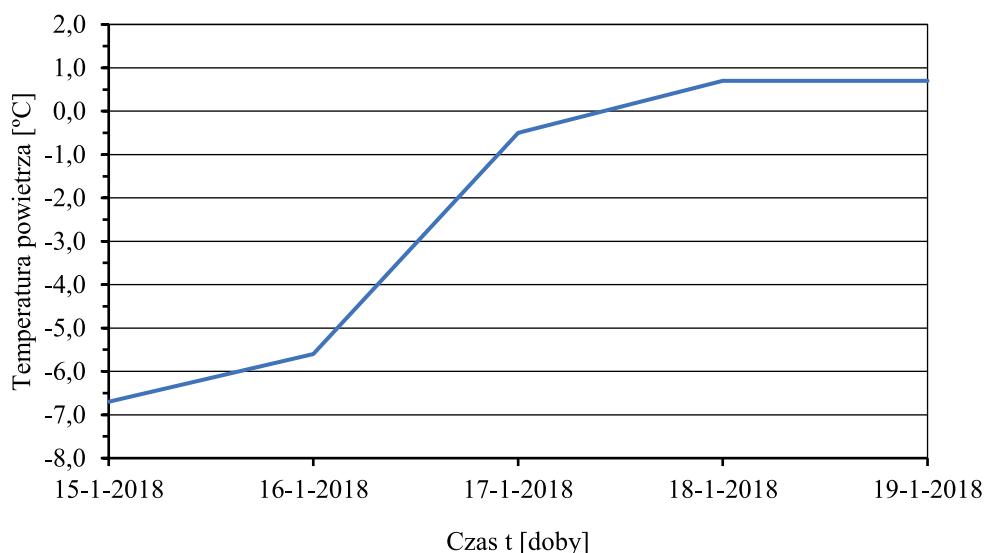
Rys. 4.15. Sytuacja lodowa na Jeziorze Zegrzyńskim na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH z dnia 18 I 2018 r.

Fig. 4.15. Ice situation of Zegrze Reservoir on 18 I 2018 SAR Sentinel-1 GRDH image



Rys. 4.16. Sytuacja lodowa na Jeziorze Zegrzyńskim na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH z dnia 19 I 2018 r.

Fig. 4.16. Ice situation of Zegrze Reservoir on 19 I 2018 SAR Sentinel-1 GRDH image .



Rys. 4.17. Średnia dobowa temperatura powietrza w dniach 15-19 I 2018 r. stacja synoptyczna w Legionowie

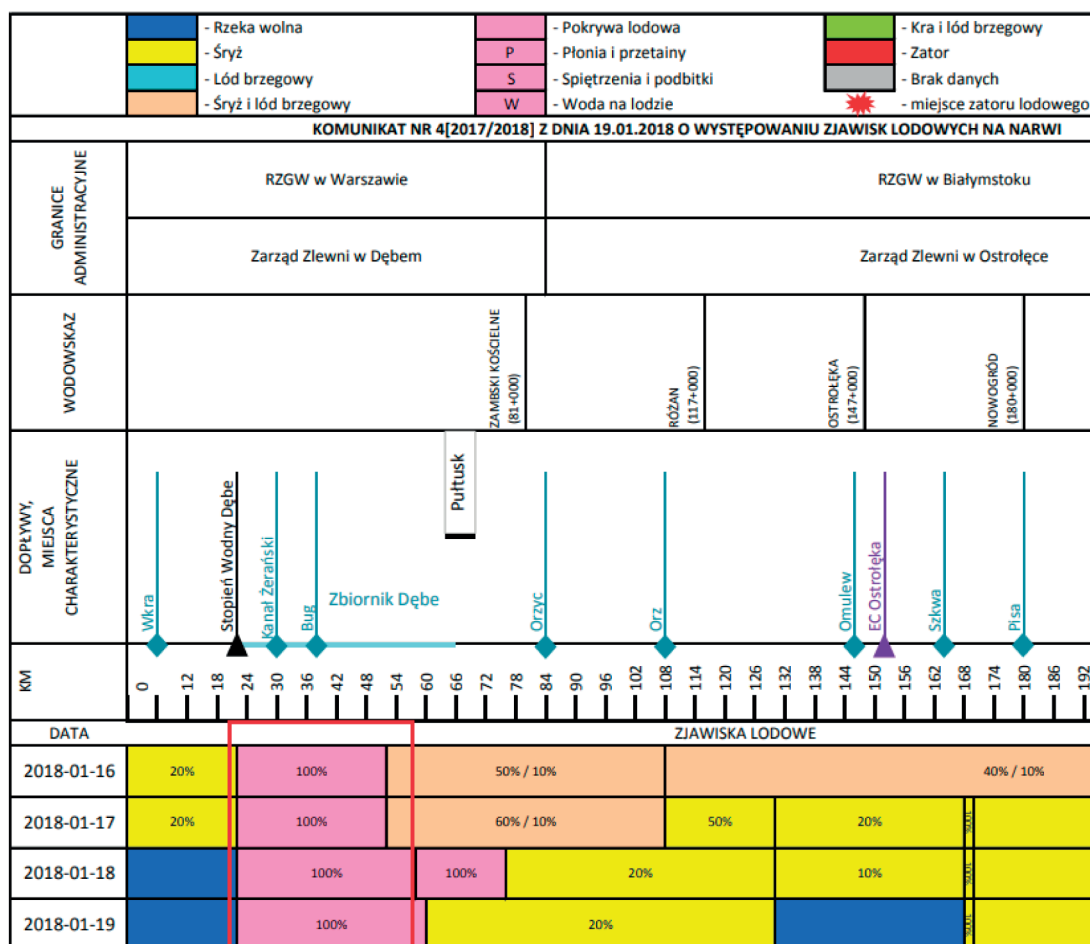
Fig. 4.17. Average daily air temperature in period 15-19 I 2018 at synoptic meteorological station in Legionowo

Na zobrazowaniu radarowym z 19 I 2019 r. można spostrzec zmianę w zarejestrowanym rozproszeniu wstecznym, bowiem zbiornik w km 30,0–36,0 Narwi charakteryzuje większa jasność pikseli i ich ziarnista struktura. Powodem tej zmiany może być faza rozpoczęcia topnienia lodu, w którego strukturze są zawarte pęcherzyki powietrza.

Przydatność obrazów satelitarnych Sentinel-1 do badania zjawisk lodowych na Jeziorze Zegrzyńskim i Bugu można ocenić także przez porównanie uzyskanych wyników do obserwacji naziemnych zawartych w komunikatach lodowych publikowanych przez RZGW Warszawa. Jako przykład wybrano wynik interpretacji polegającej na wyróżnieniu form zjawisk lodowych na kompozycji barwnej RGB uzyskanej z produktu GRDH z komunikatem lodowym dla Narwi z okresu 16–19 I 2018 r. (rys. 4.18).

W dniu 16 I 2018 r. o godz. 6:00 UTC zanotowano dopływ średni do zbiornika wynoszący ok. $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a także odpływ średni wynoszący ok. $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Na Narwi zarejestrowano od km 0,0–23,0 pokrywę śryżową (20%), natomiast w km 23,0–52,0 pokrywę lodową (100%), a od km 53,0 do 249,0 śryż z towarzyszącym mu lodem brzegowym (w proporcjach 50% / 10%). Na Bugu z kolei zanotowano obecność pokrywy lodowej w km 0,0–14,0. Porównując te dane ze zobrazowaniami Sentinel-1 można dostrzec znaczące różnice w jasności pikseli dla poszczególnych form lodu. Na zobrazowaniu z dnia 16 I 2018 r. w km 23,0–52,0 (rys. 4.11) zidentyfikowano zróżnicowane pokrywy, bowiem między km 23,0–30,0 rozproszenie wsteczne i ziarnistość są charakterystyczne dla lodu brzegowego z miejscami rzeki wolnej, a od km 36,0–42,0 radar zarejestrował rozproszenie wsteczne pokrywy charakterystyczne dla pasów śryżu i elementów lodu brzegowego.

Na Bugu rozproszenie wsteczne można przypisać pokrywie lodowej typu powierzchniowy zator z krążków śryżowych. Pozostałe miejsca można uznać za zgodne z raportem lodowym. Pokrywa lodowa w pleso Jeziora Zegrzyńskiego, wykazuje niewielkie wartości rozproszenia wstecznego oraz charakterystyczne liniowe spękania, które ułatwiają jej odróżnienie od otwartej wody.

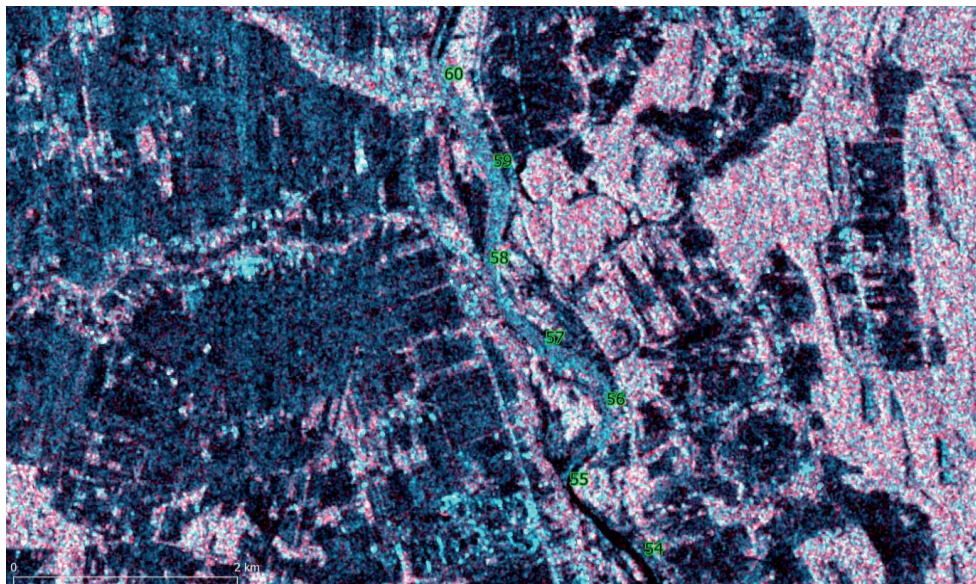


Rys. 4.18. Komunikat lodowy RZGW Warszawa z okresu 16-19 I 2018 r. z zaznaczonym odcinkiem kilometrażu Narwi przyjętym do porównań
 Fig. 4.18. Ice report RZGW Warszawa from period 16-19 I 2018 with marked distance of the Narew river taken for comparison

W dniu 18 I 2018 r. o godz. 6:00 UTC zanotowano dopływ średni do zbiornika wynoszący ok. $310 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a także odpływ średni wynoszący ok. $305 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Według komunikatu lodowego RZGW Warszawa na całej długości Jeziora Żerzyńskiego obserwowano w km 21,0–58,0 występowanie stałej pokrywy lodowej. Podobnie na Bugu w km 0,0–60,0 zidentyfikowano stałą pokrywę lodową. Bazując na zobrazowaniu Sentinel-1 z dnia 18 I 2018 r. (rys. 4.15) ustalono występowanie w km 23,0–30,0 lodu brzegowego wraz z rzeką wolną. Podobnie na km 36,0–43,0, gdzie w dalszym ciągu widoczne jest rozproszenie wsteczne charakterystyczne dla śrzyżu i lodu brzegowego. Analizując również samo ujście Bugu, przy interpretacji wizualnej pierwsze km rzeki zostałyby przyporządkowane do klasy śrzyżu. Pozostałe miejsca są zgodne z zapisem w komunikacie lodowym.

W dniu 19 I 2018 r. RZGW w Warszawie wydało komunikat o występowaniu stanów wód w strefie średnich i wysokich oraz ostrzegawczych i alarmowych. W Pułtusku o godz. 6:00 UTC stan wody wynosił 445 cm, a o godz. 10:00 UTC – 450 cm. Dopływ średni do Jeziora Żerzyńskiego wynosił $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, o godz. 6:00 UTC, a średni odpływ – ok. $280 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Powodem przyrostu stanu wody w Pułtusku był zator, który uformował się w km 55,4–60,0 między Kruczym Borkiem a Kaciami. Widoczny jest on obrazie satelitarnym Sentinel-1 zarejestrowanym w dniu 19 I 2018 r. o godz. 16.19 UTC (rys. 4.16 i 4.19). Kraniec tego zatoru przedstawiono

na rys. 4.20 na którym pokazano klatkę z filmu opublikowanego w serwisie internetowym Pultusk24.pl. Zator powstał w wyniku napływu lodu z góry rzeki ponieważ w raporcie lodowym RZGW w dniu 18 I 2018 r. zanotowano zasięg pokrywy lodowej sięgający do km 77,0, a dzień później nastąpiło skrócenie tego odcinka do km 60,0.



Rys. 4.19. Zator śryżowy na Narwi w km 55,4-60,0 między Kruczym Borkiem a Kacicami widoczny na obrazie satelitarnym SAR Sentinel-1 GRDH z dnia 19 I 2018 r., godz. 16:19 UTC

Fig. 4.19. Frazil ice jam on Narew river km 55,4-60,0 between Kruczy Borek and Kacice village visible on satellite image SAR Sentinel-1 GRDH, 19 I 2018, 16.19 UTC

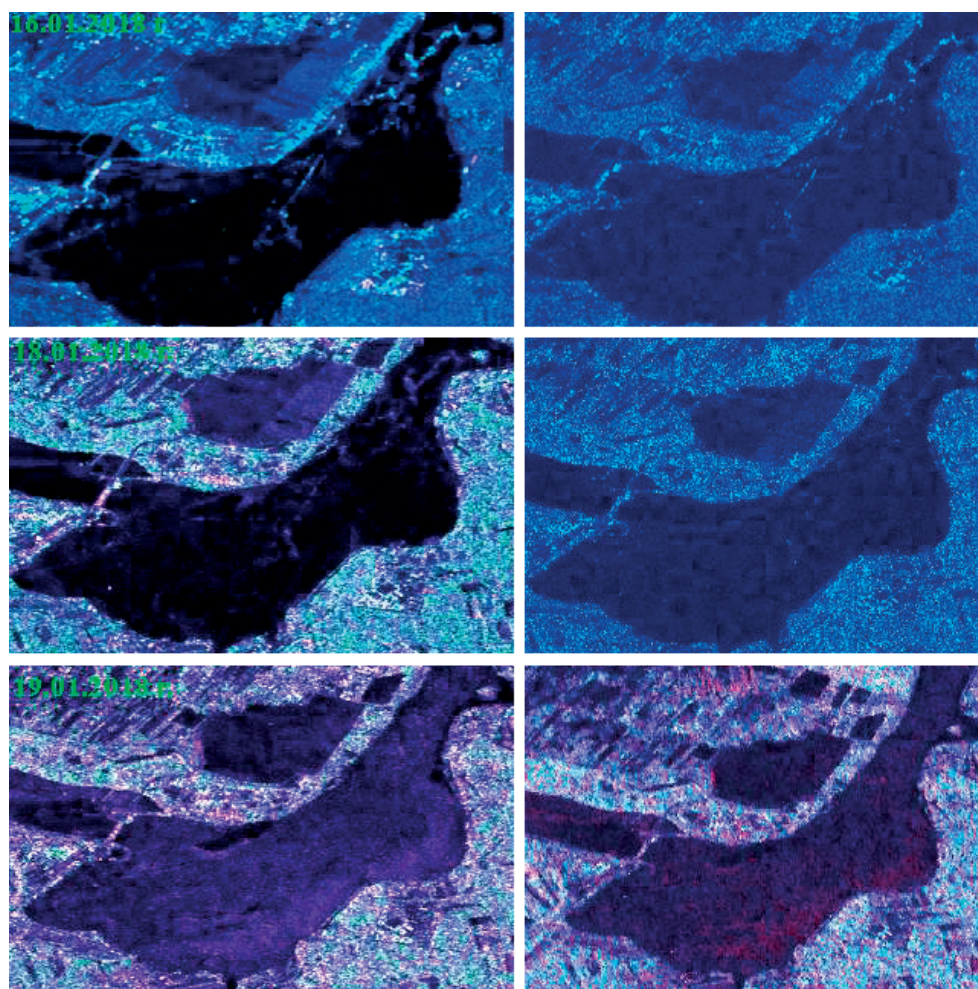


Rys. 4.20. Zdjęcie z drona z 18 I 2018 r. w km 60,0 Narwi – przedstawia napływ lodu w stronę zatoru uformowanego w km 55,4, widoczne jest spiętrzenie poziomu wody w międzywał (dzięki uprzejmości portalu internetowego Pultusk24.pl)

Fig. 4.20. Aerial picture form drone taken on 18 I 2018 showing km 60,0 of the Narew river and fragile ice accumulation at the jam edge km 55,4. (courtesy of internet portal Pultusk24.pl)

Przedstawione do tej pory przykłady zastosowania obrazów radarowych Sentinel-1 do opisu zjawisk lodowych wykorzystywały kompozycje barwne uzyskane z przetworzenia danych z produktu GRDH. W celu określenia przydatności obrazów Sentinel-1 zapisanych jako produkt SLC i ich porównania z produktem GRDH wytypowano trzy charakterystyczne dla zbiornika akweny, które były zróżnicowane pod względem interpretacji wizualnej.

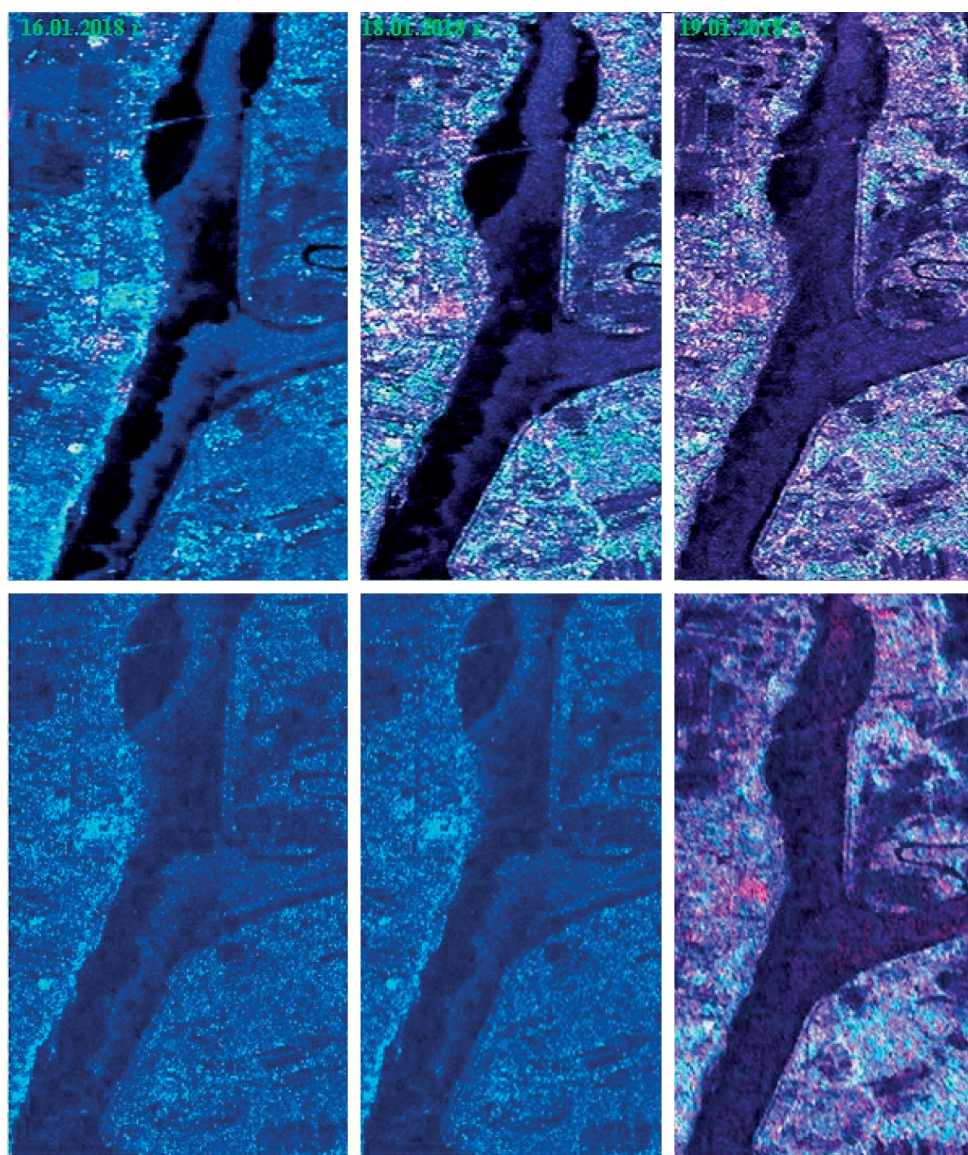
W pierwszej kolejności wzięto pod uwagę główne płośno Jeziora Zegrzyńskiego, w którym przez cały analizowany okres zarejestrowano obecność pokrywy lodowej. Na rys. 4.21 można zauważyć, że produkt SLC zawiera w zobrazowaniu znaczny udział szumu cętkowego podczas, gdy ze zobrazowań GRDH możliwe jest odczytanie większej ilości szczegółów. Cętkowa struktura znacząco obniża jakość obrazu, uniemożliwiając często wizualną interpretację obiektów. Aby zniwelować znaczący wpływ szumu cętkowego na analizowane obiekty, stosuje się różnego rodzaju filtry polarymetryczne, mające na celu jego redukcję. W tym przypadku zastosowano filtr IDAN. Podczas stosowania jednak filtrów polarymetrycznych istnieje ryzyko znacznej utraty informacji o analizowanych obiektach, co ujawniło się w przypadku analizowanych obrazów otrzymanych z produktów SLC.



Rys. 4.21. Pokrywa lodowa na głównym płośno Jeziora Zegrzyńskiego w dniach 16-19 I 2018 r. w zobrazowaniu RGB otrzymanym z przetworzenia produktów GRDH (po lewej) i SLC (po prawej)
Fig. 4.21. Ice cover on the main basin of Zegrze Reservoir in the period 16-19 I 2018 in color composition from products GRDH (left side) and SLC (right side)

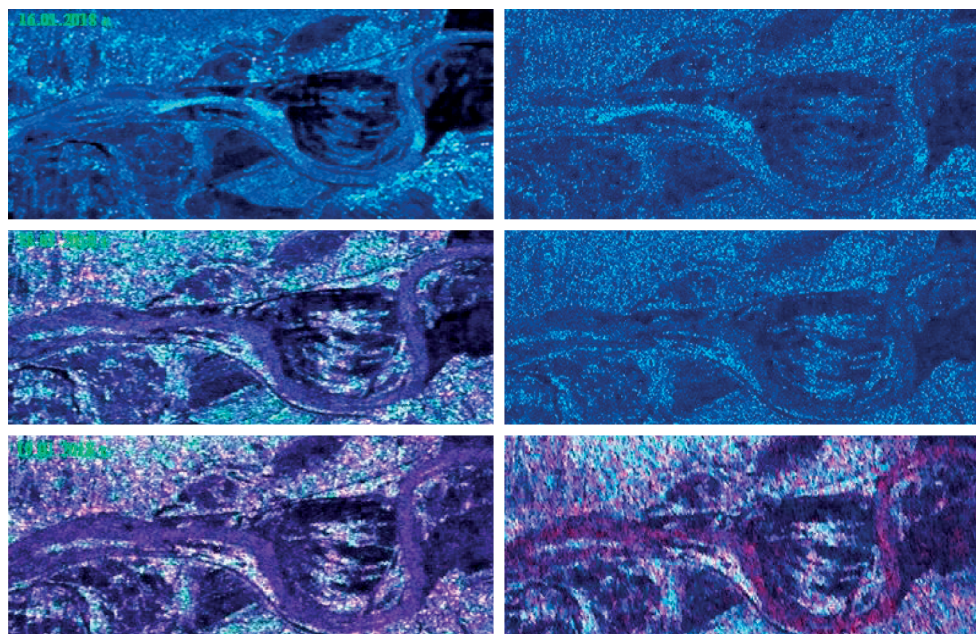
Kolejnym akwenem wybranym do porównania obrazów z produktu GRDH i SLC jest ujście Bugu, w którym występują charakterystyczne pasy form lodu zaklasyfikowanych jako śrzyż, a także niewielka ilość lodu brzegowego (rys. 4.22). Z porównania obrazów uwidacznia się znaczące obniżenie jakości zobrazowań SLC, uniemożliwiające wykrycie dokładnego zasięgu lodu brzegowego, a także obecność rozmytych krawędzi śrzyżu, co znacznie utrudnia interpretację wizualną.

Trzecim akwenem użytym do porównania obrazów z produktu GRDH i SLC jest zakole Bugu km 3,0–11,0. Tutaj zwrócono uwagę przede wszystkim na interpretację zasięgu spiętrzonej pokrywy lodowej, która była szczególnie widoczna w dniu 16 I 2018 r. (rys. 4.23). Rozdzielczość i ziarnistość obrazu, w produktach SLC jest w tym przypadku znacznie gorsza niż w GRDH. W obrazie z produktu GRDH możliwe jest wykrycie nawet lokalnego spiętrzenia lodu co jest istotne przy operacyjnym wykorzystaniu obrazów dla sporządzania raportów lodowych.



Rys. 4.22. Pokrywa lodowa w ujściu Bugu w dniach 16-19 I 2018 r. w zobrazowaniu RGB otrzymanym z przetworzenia produktów GRDH (górny rząd) i SLC (dolny rząd)

Fig. 4.22. Ice cover on the mouth of Bug river in the period 16-19 I 2018 in color composition from products GRDH (upper row) and SLC (lower row)



Rys. 4.23. Pokrywa lodowa w zakolu Bugu (km 3-11) w dniach 16-19 I 2018 r. w zobrazowaniu RGB otrzymanym z przetworzenia produktów GRDH (lewa strona) i SLC (prawa strona)
 Fig. 4.23. Ice cover on the bend of Bug river (km 3-11) in the period 16-19 I 2018 in color composition from products GRDH (left side) and SLC (right side)

W interpretacji obrazów radarowych Sentinel-1 opracowanych na podstawie produktu GRDH przydatna jest znajomość charakterystycznych wartości współczynnika rozpraszania wstecznego dla poszczególnych typów pokrywy lodowej Jeziora Zegrzyńskiego. Z drugiej strony ograniczeniem obrazowań jest poziom szumu, który według specyfikacji parametrów technicznych systemu Sentinel-1 wynosi 22 dB, a na który składa się szum wywołany temperaturą i procedurami próbkowania (ESA, 2012).

Do zgromadzenia wartości rozproszenia wstecznego w kanałach VV i VH (GRDH) oraz C2 (SLC) wykorzystano poligony wyznaczone na podstawie interpretacji wizualnej zobrazowania Sentinel-1 dla Jeziora Zegrzyńskiego z dnia 18 I 2018 r. (rys. 4.24). Liczebność pikseli należących do wybranych klas zjawisk lodowych podano w tabelicy 4.1. Wartości średnie i odchylenia standardowe obliczone dla pikseli reprezentujących poszczególne poligony zawiera tabela 4.2.

Tabela 4.1

Liczebność zbiorów pikseli reprezentujących analizowane klasy pokrywy lodowej na Jeziorze Zegrzyńskim na obrazie Sentinel-1 z dnia 18 I 2018 r. – kanały VH, VV, C2

Table 4.1

Number of pixels representing distinguished classes of ice cover on Zegrze Reservoir at Sentinel-1 image on 18 I 2018 - channels VH, VV, C2

Sentinel-1 GRDH VH			Sentinel-1 GRDH VV			Sentinel-1 SLC C2		
Klasa	Liczba poligonów	Liczba pikseli	Klasa	Liczba poligonów	Liczba pikseli	Klasa	Liczba poligonów	Liczba pikseli
FW	3	787	FW	3	787	FW	3	468
SI	4	824	SI	4	824	SI	4	494
FI	4	1264	FI	4	1264	FI	5	927
IC	3	1917	IC	3	1917	IC	3	1432
CI	3	518	CI	3	518	CI	3	424

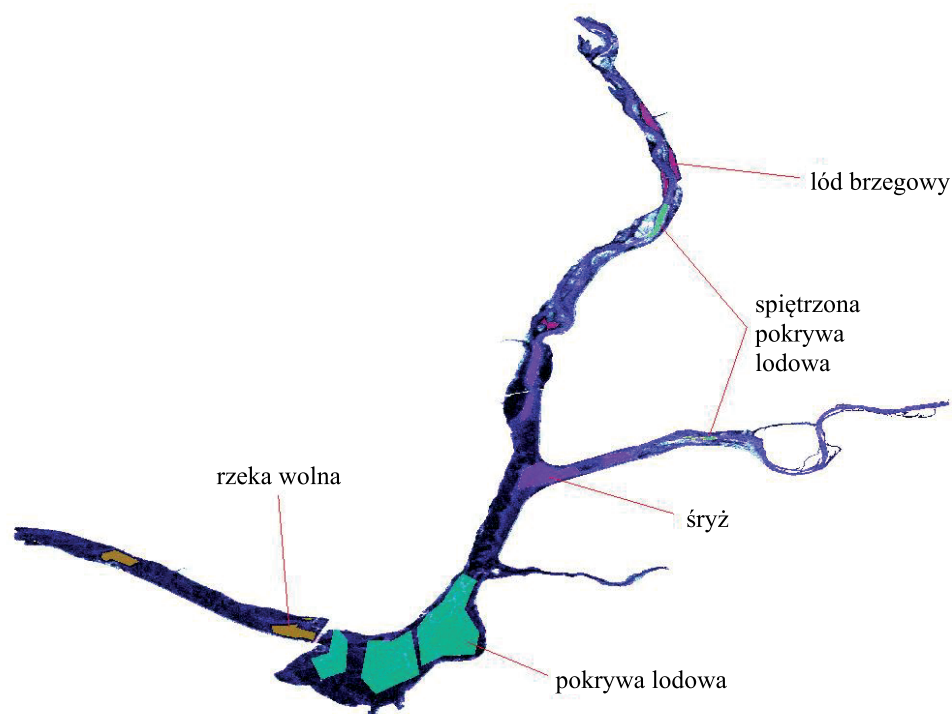
Tablica 4.2

Wartości średnie i odchylenie standardowe wartości rozproszenia wstecznego wybranych form pokrywy lodowej na Jeziorze Zegrzyńskim na obrazie Sentinel-1 z dnia 18 I 2018 r. w kanałach VH, VV, C2

Table 4.2

Average values and standard deviation of back scatter distinguished classes of ice cover on Zegrze Reservoir at Sentinel-1 image on 18 I 2018 - channels VH, VV, C2

Typ pokrywy	Kanał VH [dB]		Kanał VV [dB]		Kanał C2 [dB]	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
FW	-27,6	1,5	-20,4	1,6	-29,3	2,2
SI	-26,4	2,1	-18,9	2,2	-28,4	2,5
FI	-23,0	1,7	-13,7	1,6	-24,5	2,5
IC	-27,0	1,8	-19,0	2,0	-28,5	2,5
CI	-19,1	1,9	-10,7	1,4	-21,2	2,6



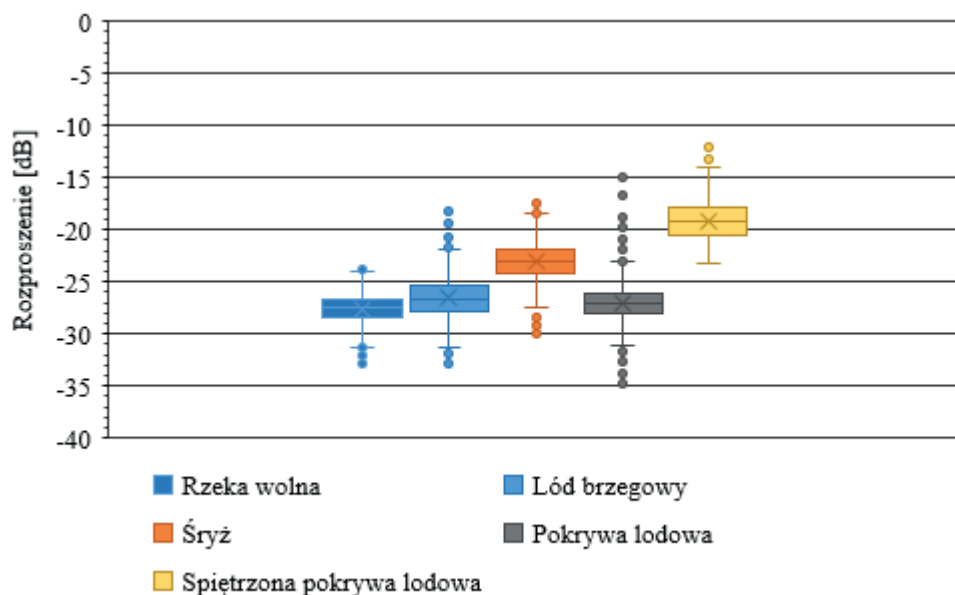
Rys. 4.24. Poligony wybrane do statystycznej analizy wartości rozproszenia wstecznego na przykładzie satelitarnego zobrazowania Sentinel-1 dla Jeziora Zegrzyńskiego z dnia 18 I 2018 r.

Fig. 4.24. Polygons selected for statistical analysis of back scatter values at Sentinel-1 satellite image of Zegrze Reservoir on 18 I 2018

Na rys. 4.25–4.27 przedstawiono wykresy obrazujące wartości średnie oraz zakres zmienności rozproszenia wstecznego w granicach wyróżnionych poligonów na obrazie z dnia 18 I 2018 r. w podziale na obrazowanie w polaryzacji VH, VV, macierz kowariancji C2.

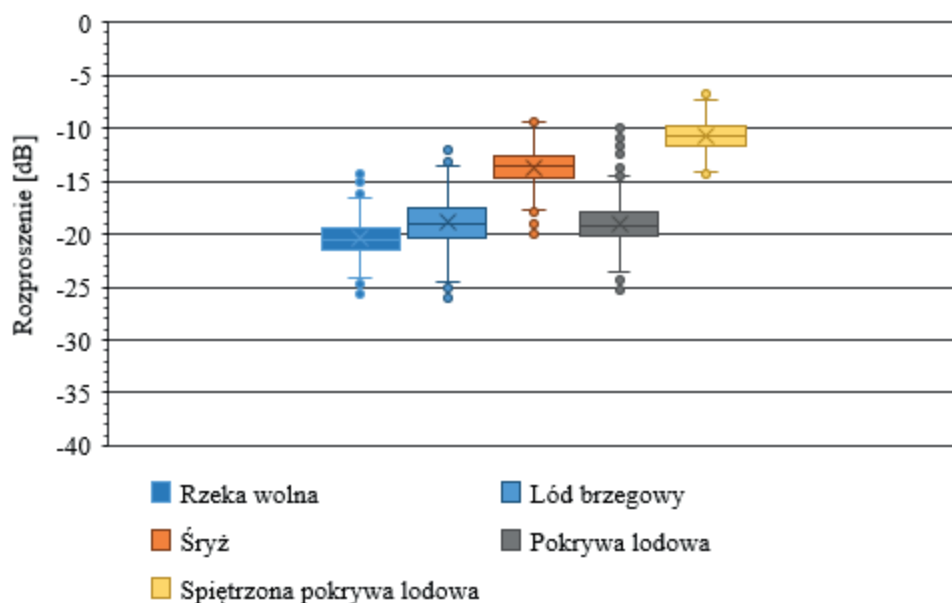
Dla klasy FW (rzeka wolna od lodu) charakterystyczne są najniższe wartości średniej rozproszenia wstecznego (od 29,3 do 20,4 dB) dla wszystkich zobrazowań (w polaryzacji VH, VV, macierz kowariancji C2). Tak niskie wartości rozproszenia spowodowane są zwierciadlanym odbiciem radarowej wiązki od jednorodnej, gładkiej powierzchni wody, co powoduje że niewielka ilość promieniowania odbitego

zostaje zarejestrowana przez antenę radaru. Wartości rozproszenia wstecznego w kanale VV są wyższe niż w kanałach VH i C2. Klasa ta charakteryzuje się odchyleniem standardowym między 1,2 a 2,2, stanowiąc dosyć jednorodną klasę. Analizując wykres „skrzynka – wąsy” można stwierdzić, że największa rozpiętość danych występuje na zobrazeniu C2. Powodem takiego wyniku może być największe występowanie na nim szumu cętkowego. Jeżeli chodzi o wartości odstające, największą ich ilość zaobserwowano na zobrazeniu VV, co może świadczyć o większej dokładności rejestracji wartości rozproszenia wstecznego.



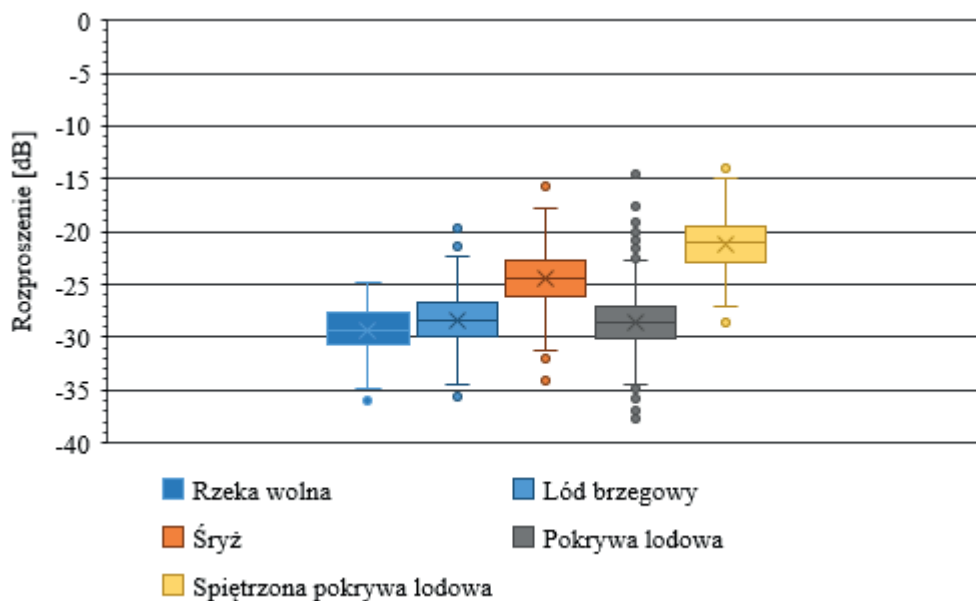
Rys. 4.25. Wykres pudełkowy wartości rozproszenia wstecznego wyróżnionych form pokrywy lodowej Jeziora Zegrzyńskiego – zobrazenie Sentinel-1 z dnia 18 I 2018 kanał VH

Fig. 4.25. Box and whisker graph of back scatter values of distinguished classes of ice cover on Zegrze Reservoir at Sentinel-1 image on 18 I 2018 channel VH



Rys. 4.26. Wykres pudełkowy wartości rozproszenia wstecznego wyróżnionych form pokrywy lodowej Jeziora Zegrzyńskiego zobrazenie Sentinel-1 z dnia 18 I 2018 kanał VV

Fig. 4.26. Box and whisker graph of back scatter values of distinguished classes of ice cover on Zegrze Reservoir at Sentinel-1 image on 18 I 2018 channel VV



Rys. 4.27. Wykres pudełkowy wartości rozproszenia wstecznego wyróżnionych form pokrywy lodowej Jeziora Zegrzyńskiego zobrazonego Sentinel-1 z dnia 18 I 2018 r. kanał C2

Fig. 4.27. Box and whisker graph of back scatter values of distinguished classes of ice cover on Zegrze Reservoir at Sentinel-1 image on 18 I 2018 channel C2

W klasie SI (łód brzegowy) zaobserwowano podobnie jak w klasie FW niskie wartości rozproszenia wstecznego (od 28,4 do -18,9 dB) dla wszystkich zobrażeń (w polaryzacji VH, VV, macierz kowariancji C2). Podobnie jak w przypadku klasy FW tak niski przedział wartości spowodowany jest zwierciadlanym odbiciem wiązki radarowej od gładkiej powierzchni lodu w przeciwnym kierunku od anteny. Wiąże się to także z faktem, że łód brzegowy jest bardzo cienki, jako łód inicjalny powstający z kryształów formujących się z przechłodzonej wody nie zawiera w sobie pęcherzyków powietrza, co skutkuje brakiem odbicia wstecznego wiązki radarowej. Wartości odchylenia standardowego w klasie SI wykazują większą jednorodność danych niż w klasie FW. Na podstawie wykresów można stwierdzić wyższe wartości rozkładu danych dla tej klasy. Łód brzegowy na swojej krawędzi może być rozbudowany o przyłączony do jego krawędzi łód mobilny, który spiętrza się co skutkuje większą zdolnością do odbicia fal radarowych i wyższymi wartościami odbicia wstecznego. Analizując wartości odstające, największą ich ilość zarejestrowano w zobrażowaniu VH z dnia 18 I 2018 r.

Klasa FI (śryż) charakteryzuje się średnimi wartościami rozproszenia wstecznego (od -24,5 do -13,7 dB), co tłumaczyć można większą chropowatością powierzchni krążków śryżowych. Warto zauważyć, że zakres wartości średnich rozproszenia wstecznego jest znacznie mniejszy na zobrażowaniu C2, w porównaniu z obrazami w polaryzacji VV i VH. Największe wartości rozproszenia wstecznego ma obraz zarejestrowany w polaryzacji VV.

Klasa pokrywy lodowej (IC) wykazuje wartości rozproszenia wstecznego (od -28,5 do -19,0 dB) podobne do klas FW i SI. W dniu rejestracji obrazów pokrywa lodowa charakteryzowała się bardzo niskim rozproszeniem wstecznym, charakterystycznym dla pierwotnej pokrywy lodowej utworzonej na spokojnej wodzie. Jednocześnie we wszystkich zobrażowaniach zanotowano największą liczbę wartości odstających, co prawdopodobnie może być spowodowane zarejestrowaniem wartości rozproszenia

wstecznego w miejscach spękania pokrywy lodowej, występujących na dużym płosko jeziora.

Spiętrzona pokrywa lodowa (CI) charakteryzuje się najwyższymi wartościami rozproszenia wstecznego (od -21,2 do -10,7 dB) spośród wszystkich klas zjawisk lodowych. Najwyższą wartość rozproszenia wstecznego miał kanał w polaryzacji VV, reprezentujący powierzchniowy zator śryżowy. Odchylenie standardowe danych jest najmniejsze w obrębie tej klasy zjawisk lodowych.

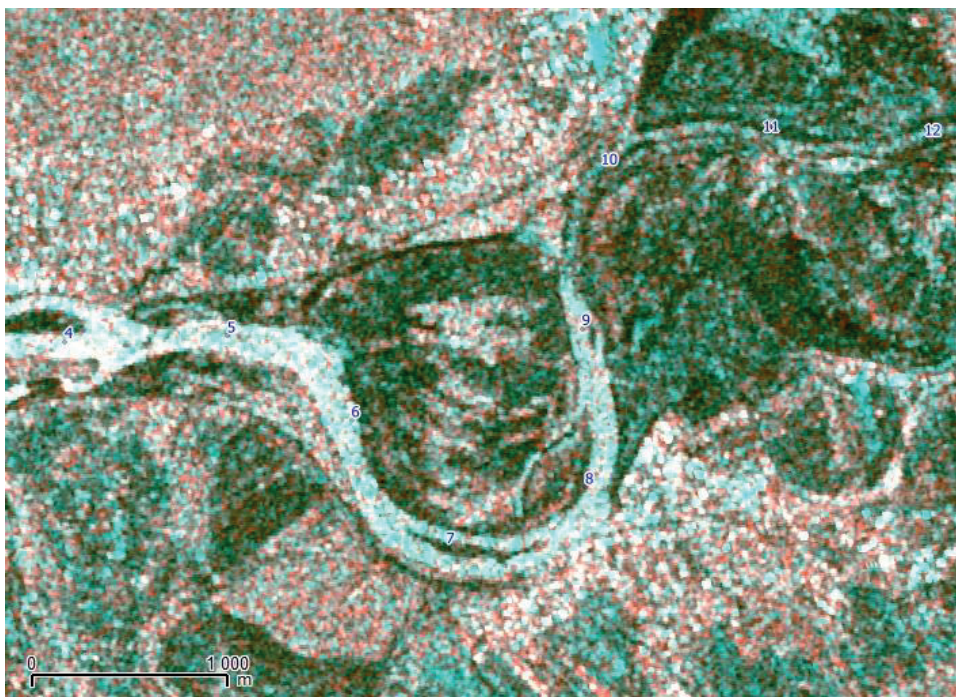
Uzyskane w tym opracowaniu wyniki rozkładu wartości rozproszenia wstecznego są zgodne z obserwacjami przedstawionymi w pracach Murfitta i Duguay'a (2020). Według tych autorów początkowa faza formowania lodu jeziornego charakteryzuje się małymi wartościami rozproszenia wstecznego, za sprawą odbicia zwierciadlanego. Wyższe wartości rozproszenia wstecznego obserwowane na satelitarnych obrazach SAR w początkowej fazie formowania pokrywy lodowej są związane z obecnością spękań i deformacji lodu.

Z biegiem czasu rozproszenie wsteczne wzrasta za sprawą zróżnicowania stałej dialektycznej między wodą i lodem, a także wzrostem nierówności na kontakcie woda-lód. Najnowsze badania potwierdzają, że kontakt wody z lodem ma duże znaczenie dla rozproszenia fal radarowych i przekłada się na silne echo (Atwood i in., 2015, Gunn i in., 2018).

W miarę wzrostu temperatury w dalszej części sezonu lodowego, obserwuje się wzrost zawartości wody na powierzchni lodu lub w pokrywie śnieżnej na lodzie, co sprawia, że większe może być pochłanianie sygnału radarowego, a także powierzchnia lodu jest bardziej wygładzona. Obydwa mechanizmy przekładają się na spadek wartości rozproszenia wstecznego (Duguay i in., 2002).

Uzyskane niskie wartości rozproszenia wstecznego dla otwartej powierzchni wodnej i nowej pokrywy lodowej typu jeziornego są zgodne z wynikami przedstawionymi przez Nghiem i Leshkevich (2007) w badaniach prowadzonych na jeziorze Superior z zastosowaniem danych naziemnych z radaru SAR zainstalowanego na pokładzie lodolamacza. Prowadzili oni porównawcze pomiary przy użyciu wiązki radarowej pasma C o kącie padania z zakresu od 0° do 60° . Dla porównania z pomiarami naziemnymi wykorzystywali obrazy SAR z satelity Radarsat. Konkluzją ich badań jest stwierdzenie, że rozróżnienie nowego lodu jeziornego od spokojnej wody jest bardzo trudne ponieważ wartości rozproszenia wstecznego obydwu powierzchni są poniżej progu szumu, który wynosi -20 dB dla obrazów SAR Radarsat. Dopiero w warunkach sztormowej pogody, gdy powierzchnia odkrytej wody jest sfalowana, następuje lepsze odbicie fal radarowych, co ułatwia jej odróżnienie od gładkiej powierzchni lodu. Autorzy zwracają uwagę, że spiętrzony lód może być jednoznacznie odróżniony od otwartej powierzchni wody, przy prędkości wiatru poniżej $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (8° B). Problem z interpretacją obrazów SAR pojawia się również w fazie zaniku lodu i zmiany jego struktury na kryształy słupkowe (ang. *candle stage*). W miarę topnienia lodu, zbierająca się na jego powierzchni woda może częściowo maskować odbicie od lodu.

Radarowe obrazy satelitarne SAR z misji Sentinel-1 mogą służyć także do opisu przebiegu zjawisk lodowych w czasie. Na obrazach z produktu GRDH szczególnie dobrze uwidaczniają się spiętrzenia lodu mobilnego tworzące powierzchniowe zatory śryżowe. Obrazy SAR Sentinel-1 są dostarczane w krótkim czasie po rejestracji, a obrazy mogą być pozyskiwane niezależnie od pory dnia i stopnia zachmurzenia. Dla przykładu, w analizowanym okresie lutego 2018 r. dostępnych jest 19 obrazów SAR Sentinel-1 i zaledwie jeden obraz wielospektralny z zakresu optycznego Sentinel-2 bez pokrycia chmurami. Obrazy wielospektralne stanowią cenne



Rys. 4.28. Zator śryżowy w zakolu Bugu i lód w kanale powodziowym Brachnia na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH z dnia 24 II 2018 r.

Fig. 4.28. Pancake ice jam at bend of Bug river and ice cover at Brachnia flood channel at SAR Sentinel-1 GRDH on 24 I I2018



Rys. 4.29. Zator śryżowy w zakolu Bugu i lód w kanale powodziowym Brachnia na obrazie RGB 432 Sentinel-2 w dniu 24 II 2018 r.

Fig. 4.29. Pancake ice jam at bend of Bug river and ice cover at Brachnia flood channel at RGB 432 Sentinel-2 on 24 I I2018

uzupełnienie obrazów Sentinel-1, ułatwiając rozróżnianie powierzchni wody wolnych od lodu i gładkich powierzchni lodu jeziornego. Dla przykładu na rys. 4.28 i 4.29 pokazano fragment zakola Bugu zarejestrowany na obrazach SAR Sentinel-1 i obrazie wielospektralnym Sentinel-2 w dniu 24 II 2018 r. Na uwagę zasługuje kanał powodziowy o nazwie Brachnia przecinający zakole Bugu między km 5,0–10,0. Jest to swojego rodzaju przetoka, która powstała w czasie katastrofalnej powodzi w 1979 r. W celu ochrony pobliskich miejscowości Popowo i Kania, przepływ w kanale Brachnia jest dławiony progiem zlokalizowanym na prawym brzegu Bugu w km 9,5. W warunkach zimowych przy braku przepływu woda w kanale zamarza i tworzy się na niej gładka pokrywa lodowa widoczna na obrazie SAR Sentinel-1 jako ciemna linia z niskim rozproszeniem wstecznym. Na obrazie z satelity Sentinel-2 w zakresie promieniowania widzialnego widoczna jest natomiast różnica między spiętrzoną lodem prądowym w głównym korycie Bugu i gładką białą powierzchnią lodu w kanale powodziowym.

W przypadku powstania zatoru śryżowego lub lodowego dochodzi do spiętrzenia wody w korycie rzeki powyżej końca zatoru. Prowadzić to może do powodzi zatorowych, kiedy przy danym przepływie osiągnięty zostanie stan wody znacznie wyższy niż wynika to z zależności $Q = f(H)$. Powodzie zatorowe z ich rekordowo wysokimi stanami wody mają znacznie krótszy czas powtarzalności niż powodzie opadowe (Beltaos, 2000). Powodem zakłócenia związku stan-przepływ jest zmiana warunków hydraulicznych w pokrytym lodem korycie, w którym zmienia się obwód zwilżony, powierzchnia przekroju i opory ruchu. Na końcu zatoru powstaje także załamanie spadku podłużnego rzeki, na którym dochodzi do gromadzenia się wody i wzrostu stanów nie wywołanych przyrostem przepływu. W celu określenia przepływu w warunkach zlodzenia konieczne jest do wartości Q otrzymanej z krzywej przepływu wprowadzanie poprawki, zwanej współczynnikiem redukcji zimowej (Paślawski, 1970). Wielkość spiętrzenia wody na końcu zatoru zależy od jego grubości i chropowatości, a także od prędkości przyrastania pokrywy w wyniku zatrzymywania napływającego z góry rzeki śryżu. Miejscem sprzyjającym tworzeniu się grubych zatorów i spiętrzeń wody na ich końcu jest ujście rzeki do jeziora lub odbornika o małym spadku podłużnym. W miarę rozbudowy długości zatoru efekt spiętrzenia poziomu wody przesuwają się w górę rzeki (Prowse i Beltaos, 2002).

Początkowa faza tworzenia się zatoru zależy od tego czy rozwija się on w wyniku stopniowego przyrostu śryżu pływającego po powierzchni, czy też krążki śryżowe są wciągane pod powierzchnię już utworzonej stałej pokrywy lodowej powodując wzrost jej grubości. Pierwszy mechanizm stopniowej rozbudowy pokrywy lodowej w wyniku zatrzymania pływających po powierzchni krążków śryżowych jest typowy dla rzek nizinnych o szerokim korycie i małych prędkościach, które nie powodują wciągania śryżu pod taflę stałego lodu. W warunkach gdy prędkość przepływu jest na tyle duża że dochodzi do zatapiania śryżu i wciągania go pod pokrywę lodową powstaje zator nazywany w zatorze wąskiego koryta (ang. *narrow-channel ice jam*). Warunkiem utrzymania się stabilnego zatoru powierzchniowego jest wytrzymałość pokrywy lodowej na, którą działa zwiększone naprężenie styczne wywierane przez płynącą wodę i działanie zgodnej ze spadkiem podłużnym rzeki składowej ciężaru pokrywy lodowej. Gdy pokrywa ma dostateczną sztywność to te siły naporu będą przenoszone na brzegi rzeki. W przeciwnym przypadku pokrywa lodowa będzie ulegać zagęszczaniu i nasuwaniu się na siebie w efekcie „teleskopowym”, co prowadzi do wzrostu grubości zatoru i większej sztywności pokrywy lodowej.

Na rys. 4.30–4.33 pokazano kolejne obrazy SAR Sentinel-1 z okresu 23–27 II 2018 r. obejmujące dolny odcinek Bugu, na których widać rozbudowujący się zator śryżowy tworzący stałą pokrywę lodową. Dzięki takiej sekwencji obrazów można określić

tempo rozwoju zatoru od miejsca jego powstania w ujściu Bugu do Jeziora Zegrzyńskiego. W tabelicy 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 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,

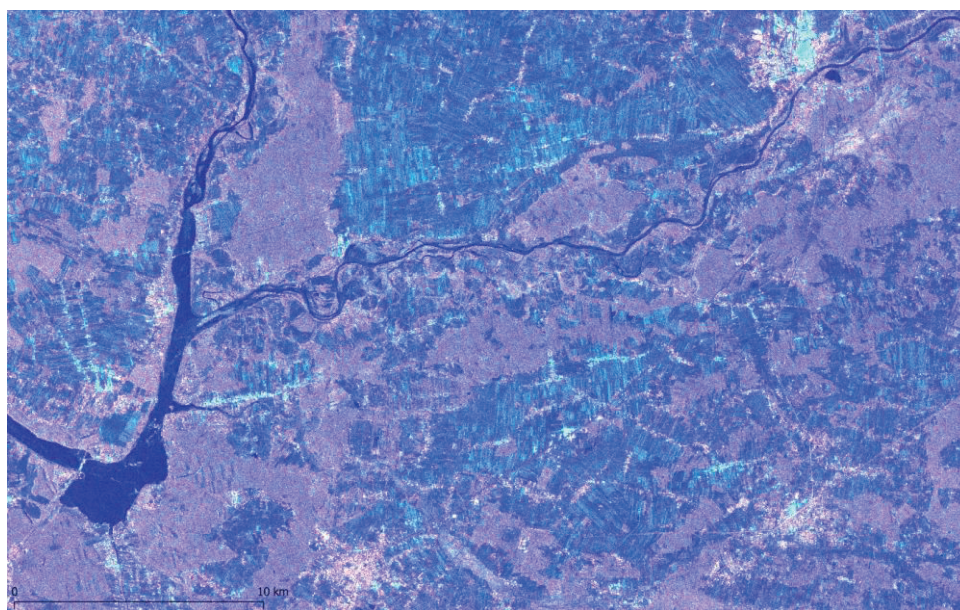
Tablica 4.3

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

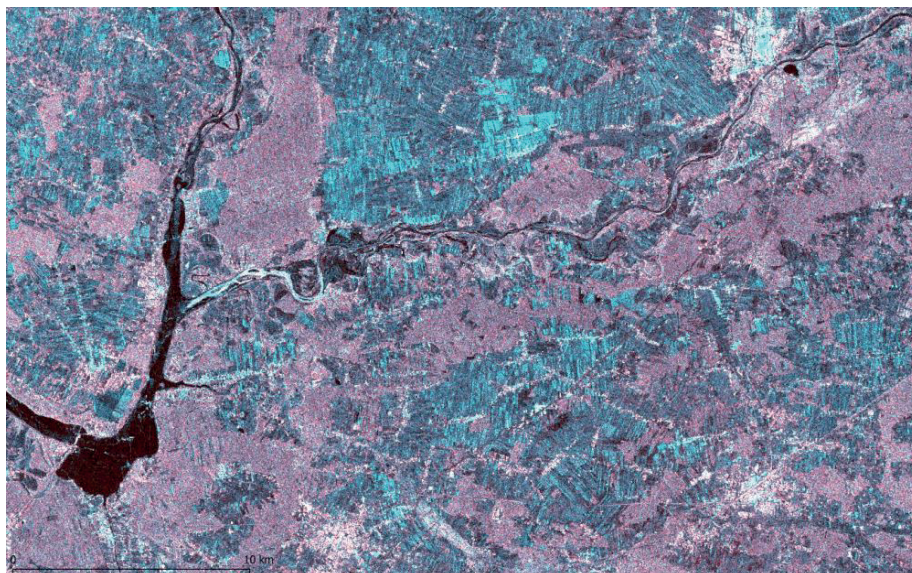


Rys. 4.30. Zator śryżowy na Bugu (km 0-2) widoczny na obrazie SAR Sentinel-1 GRDH z dnia 23 II 2018 r. godz. 16:23

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

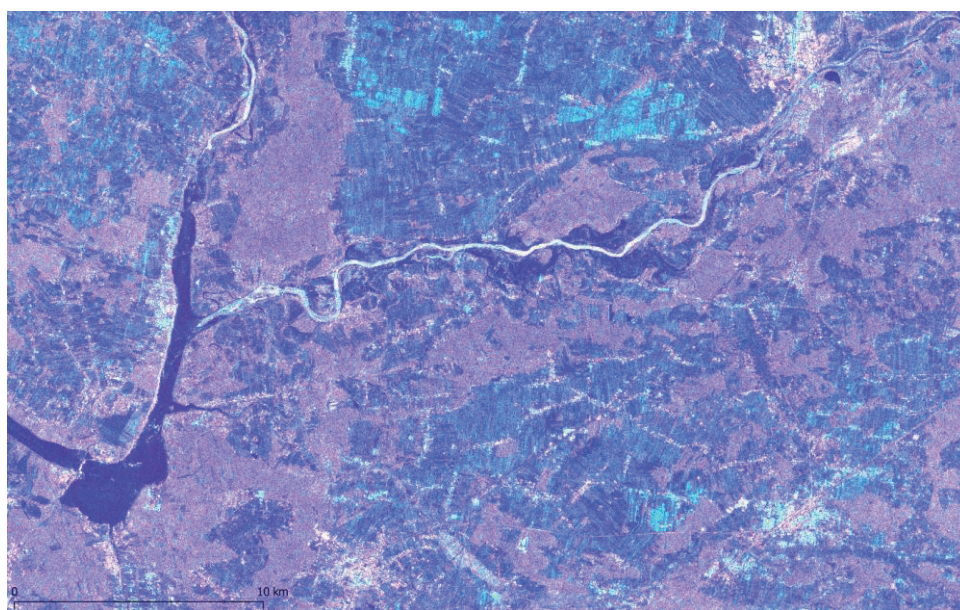
natomiast w zakolu Bugu (km 5,0–9,0) są to już prędkości typowe dla swobodnie płynącej rzeki 0,4–0,6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

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

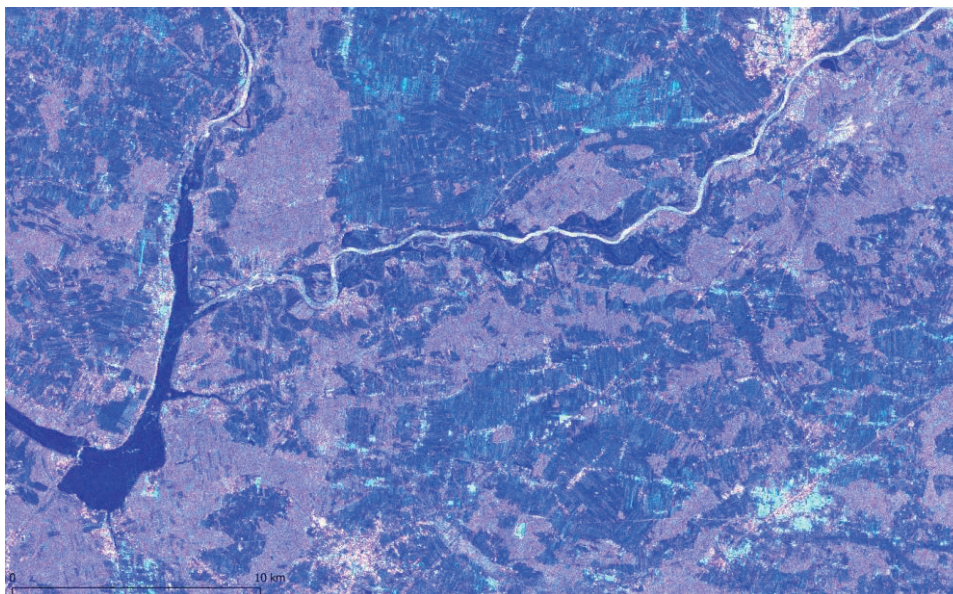
Fig. 4.31. Frazil ice jam on Bug river (km 0-9) at SAR Sentinel-1 image on 24 II 2018 16:19



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 następnego dnia w wyniku rozbudowy utworzonej ze śryżu pokrywy lodowej w górę rzeki.

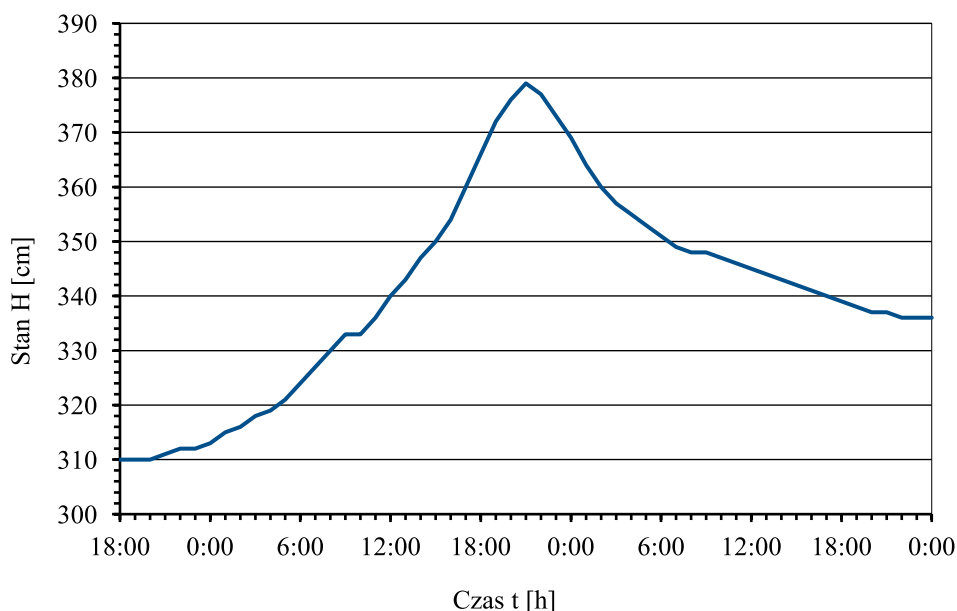
W profilu Popowo na Bugu w kolejnych dniach gdy ustabilizował się przepływ pod pokrywą lodową stany wody nie ulegały zmianie (rys. 4.36). W wyniku napływu śryżu przesuwający się w górę rzeki kraniec zatoru osiągnął km 31,0, co jest widoczne na obrazie SAR Sentinel-1 z dnia 26 II 2018 r. godz. 04:52 (rys. 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 krażki 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

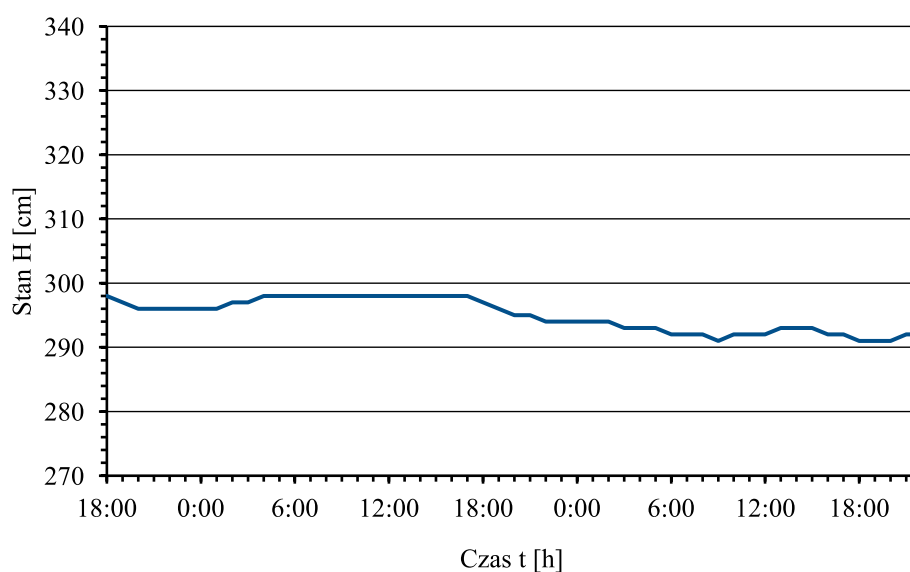
łatwe do identyfikacji na obrazach uzyskanych jako kompozycja barwna, odwzorowują się bowiem jako biała wstęga.

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.



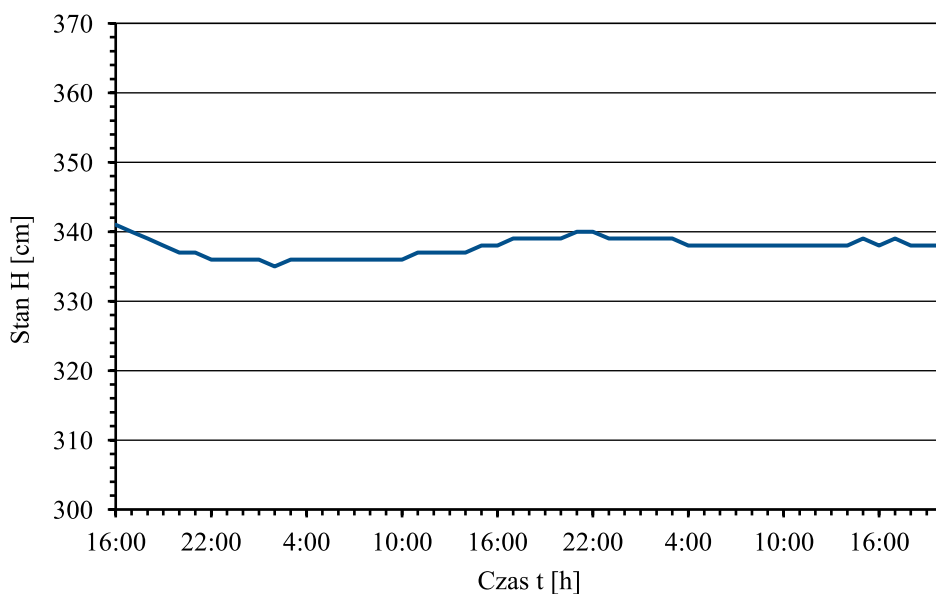
Rys. 4.34. Wzrost stanów wody w posterunku Popowo na Bugu (km 9,5) w dniu 24 II 2018 r. spowodowany zatorem śryżowym, którego kraniec zatrzymał się w czasie kulminacji na km 9 biegu rzeki

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

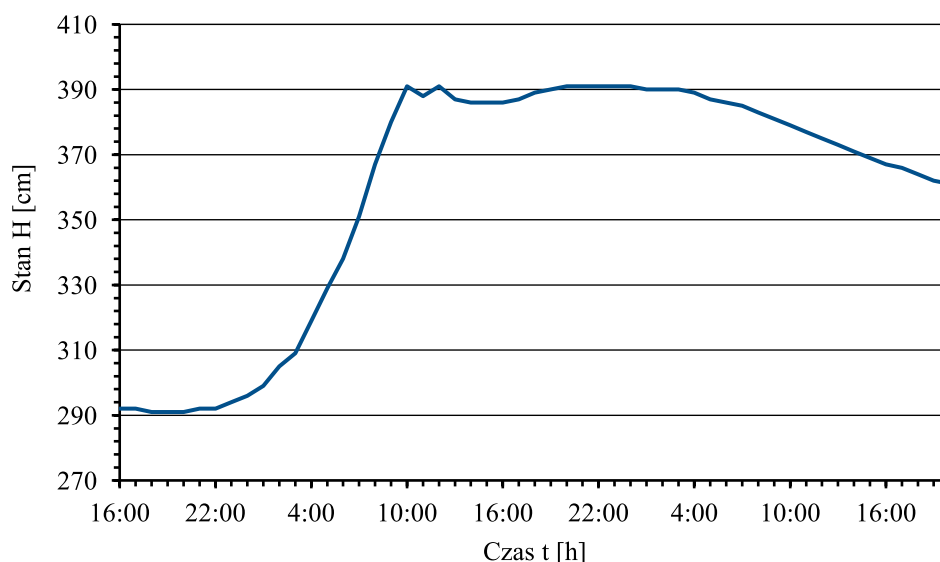


Rys. 4.35. Przebieg stanów wody na wodowskazię Wyszków (km 34,5) na Bugu w warunkach braku zlodzenia i równoczesnym spiętrzeniu wody przez zator śryżowy w km 9 w dniu 24 II 2018 r.

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

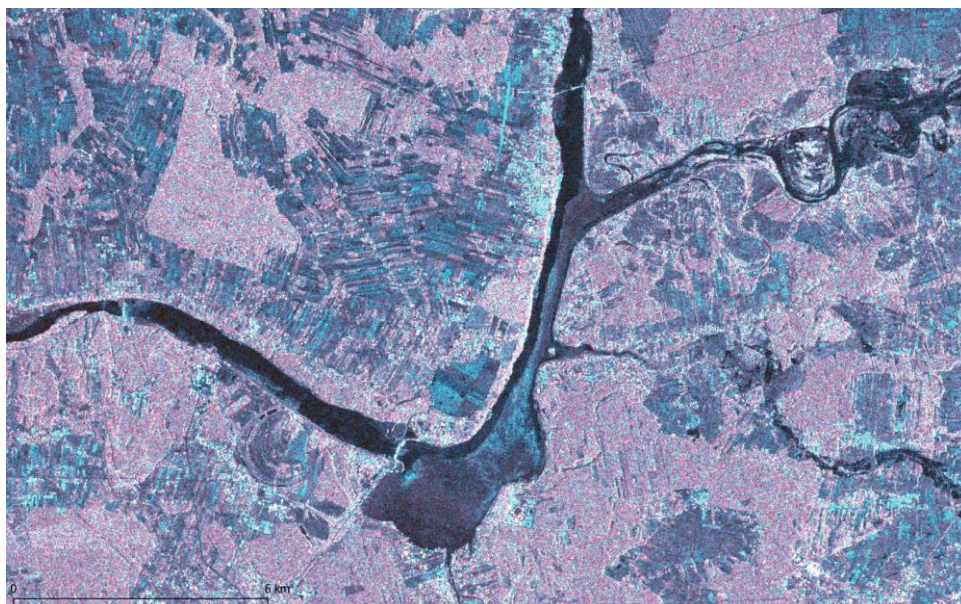


Rys. 4.37. Przebieg stanów wody na posterunku wodowskazowym Wyszków na Bugu (km 34,5) w dniach 26-27 II 2018 r. w warunkach spiętrzenia wody przez zator śryżowy w km 31,0
Fig. 4.37. Water stages at Wyszków gauge on Burg River (km 34,5) measured in the period 26-27 II 2018 during influence of frazile 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 plosu, a w ostatniej kolejności topi się lód zalegający w dużym plosu. Powodem wcześniejszego topnienia lodu w dawnym korycie Narwi jest wyższa temperatura wody płynącej z góry rzeki, ogrzanej przez zrzut wód chłodniczych w elektrowni Ostrołęka.

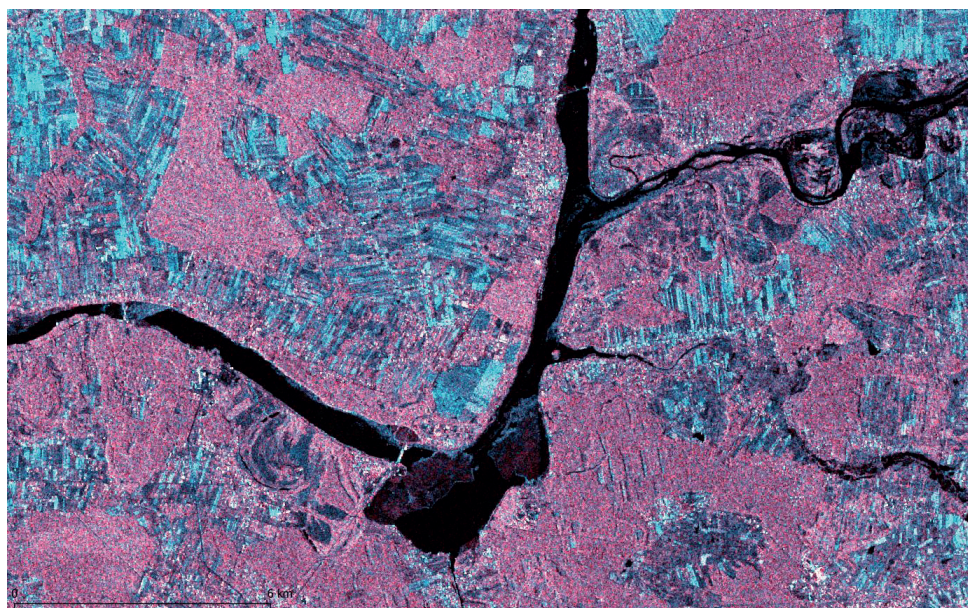
Gdy topnieje lód w jeziornej część zbiornika, ulega on odspojeniu od brzegów, dzięki czemu może swobodnie przemieszczać się po akwenie. Dobrym przykładem takiego przebiegu zdarzeń jest zanik stałej pokrywy lodowej w głównym plosu zbiornika w dniu 31 I 2018 r. Na Jeziorze Zegrzyńskim wystąpił wówczas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