

Badania lodu rzecznoego z wykorzystaniem satelitarnych danych SAR – przegląd zastosowań i metod

River ice analysis with satellite SAR data – a review of applications and methods

Helena ŁOŚ

Faculty of Geodesy and Cartography,
Warsaw University of Technology
Warsaw, Poland

Abstract

The article presents the latest research in which SAR data were used for river ice analysis. 16 publications published between 2010 and 2017 have been selected. The articles are grouped in three categories: research on interaction between an ice type and backscatter, detection and classification of ice types, ice thickness estimation. Research method and area of interest are given with each reference.

Keywords: river ice, SAR, applications review, methods review

Abstrakt

Artykuł prezentuje najnowsze badania w których dane SAR były wykorzystane do analiz pokrywy lodowej. Wybrano 16 publikacji opublikowanych w latach 2010 – 2017. Artykuły pogrupowano w trzech kategoriach: badania zależności pomiędzy typem lodu a współczynnikiem rozpraszania, rozpoznawanie i klasyfikacja form lodowych, szacowanie grubości lodu. Przy każdym odniesieniu podano metodę badawczą oraz obszar opracowania.

Słowa kluczowe: lód rzeczny, SAR, przegląd zastosowań, przegląd metod

1. Wprowadzenie

Pokrywa lodowa jest naturalnym zjawiskiem występującym cyklicznie na rzekach klimatu umiarkowanego i polarnego. Przebieg pełnego cyklu zlodzenia składa się z trzech faz: powstawania, zalegania i rozpadu. W każdej z faz stan pokrywy lodowej powinien być regularnie monitorowany. Wśród głównych przyczyn monitorowania są: utrzymanie drożności spławnych odcinków rzek, regulacja pracy hydroelektrowni, ochrona przeciwpowodziowa. Wśród wszystkich składowych kriosfery lód słodkowodny jest najrzadziej badany z wykorzystaniem

danych satelitarnych (Duguay i in., 2014). Stosowanie danych satelitarnych pozwala na regularne pozyskanie informacji o sytuacji lodowej dla długich odcinków rzek. Zaletą danych SAR jest zdolność do przenikania przez chmury, penetracja suchego śniegu oraz lodu (zależnie od jego właściwości).

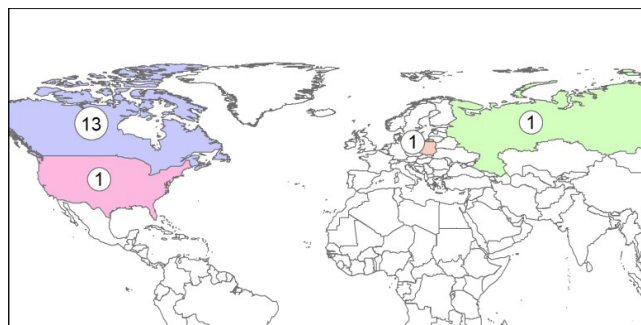
Artykuł ma na celu przedstawienie najnowszych badań wykorzystujących satelitarne dane SAR w badaniach lodu rzecznoego. Podczas jego opracowywania postawiono trzy pytania. Jakie są główne kierunki badań? Gdzie znajdują się obszary badawcze? Jakie metody analiz danych SAR są stosowane?

2. Selekcja artykułów

Publikacje do prezentowanego artykułu zostały dobrane w dwóch etapach. W pierwszym etapie wykorzystano bazę naukową Scopus prowadzoną przez wydawnictwo Elsevier. Wykorzystano trzy kryteria dotyczące: formy publikacji, roku opublikowania, słów zawartych w tytule, abstrakcie lub słowach kluczowych. Wybrano artykuły z czasopism, rozdziały z książek oraz artykuły publikowane jako materiały z konferencji, które zostały opublikowane w latach 2010 – 2017. Dzięki temu prezentowany artykuł przeglądowy dotyczy najnowszych publikacji. Przegląd zawierający wcześniejsze publikacje można znaleźć u Duguay i in. (2014). Kryterium doboru artykułu na podstawie zwrotów w tytule, abstrakcie lub słowach kluczowych było następujące: jako obowiązkowy wybrano termin „river ice” i dodatkowo jeden z terminów „SAR”, „RADARSAT-2”, „TerraSAR-X”, „ALOS”. Znaleziono 8 artykułów w czasopismach, 2 rozdziały w książkach oraz 5 artykułów opublikowanych jako materiały z konferencji. Pełne teksty jednego artykułu, jednego z rozdziałów oraz jednego z artykułów opublikowanych jako materiały z konferencji nie były dostępne w ramach ustawień dostępności Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej. Z tego względu pominięto te pozycje w prezentowanym artykule.

Kolejnym etapem szukania artykułów był przegląd publikacji z wystąpień na warsztatach Committee of River Ice Processes and the Environment (CRIPE). Są to jedyne warsztaty o zasięgu międzynarodowym ukierunkowane wyłącznie na zjawiska lodowe na rzekach. Kanadyjska Unia Geofizyczna organizuje je cyklicznie co dwa lata. Wysoki poziom prezentowanych prac oraz długoletnia tradycja warsztatów zdecydowały o uwzględnieniu prezentowanych tam publikacji w niniejszym artykule. Wybrano te publikacje, które związane są z satelitarnymi danymi SAR. Ponieważ na stronie internetowej CRIPE nie ma narzędzia umożliwiającego wyszukiwanie według zadanych kryteriów, selekcji dokonano przeglądając listę tytułów publikacji.

Stosując opisany sposób selekcji otrzymano 16 publikacji. Rys. 1 przedstawia liczbę publikacji według kraju w którym znajdował się obszar opracowania. Sprawdzono także afiliację pierwszego autora publikacji. W 14 przypadkach jest to ten sam kraj w którym znajduje się obszar badawczy. W przypadku obszaru badawczego leżącego w Rosji badania były wykonane przez naukowców z Niemiec. W przypadku jednej z publikacji dotyczącej obszaru badawczego położonego w Kanadzie afiliacją pierwszego autora jest uczelnia w Polsce. Jednak w tym przypadku współautorami są naukowcy pracujący w Kanadzie. Jak pokazuje zaprezentowane zestawienie wśród badań zjawisk lodowych na rzekach z wykorzystaniem obrazów SAR zdecydowanie pierwsze miejsce zajmują kanadyjskie ośrodki badawcze. Poza warunkami klimatycznymi istotnym czynnikiem jest posiadanie krajowego systemu satelitarnego RADARSAT-2.



Rys. 1. Liczba artykułów poświęconych wykorzystaniu satelitarnych danych SAR w badaniach lodu rzecznoego według kraju obszaru opracowania (lata 2010-2017).

3. Zależność między typem lodu a współczynnikiem rozpraszania

Gherboudj i in. (2010) opracowali model odbicia dla wybranych form lodu rzecznoego: lodu śnieżnego, śryżu, lodu brzegowego. Model opisuje mechanizmy odbicia na granicach między ośrodkami o różnych właściwościach dielektrycznych: powietrze – lód, woda – lód. Wyniki prezentowanych badań pozwalają w dużym stopniu na zrozumienie zależności między odbiciem rejestrowanym przez radar a występującą na rzece pokrywą lodową. Autorzy badali czysty lód (bez pęcherzy powietrza), lód z pęcherzami powietrza oraz porównywali lód czysty i śryż. W przypadku czystego lodu wraz ze wzrostem wartości kąta padania wiązki wartość współczynnika rozproszenia maleje. Spadek jest większy dla polaryzacji HH niż dla polaryzacji VV. Także wraz ze wzrostem grubości czystego lodu spada wartość współczynnika rozpraszania. Natomiast w przypadku lodu zawierającego pęcherzyki powietrza współczynnik rozpraszania rośnie wraz ze wzrostem grubości lodu. Podobnie współczynnik ten wzrasta gdy występuje więcej pęcherzy powietrza. W przypadku rozróżniania czystego lodu i śryżu różnica wartości współczynników rozpraszania dla obydwu typów wzrasta wraz ze wzrostem wartości kąta padania wiązki. Różnica ta jest zmienna dla różnych częstotliwości – im wyższa częstotliwość tym większa różnica wartości.

4. Rozpoznawanie i klasyfikacja typów lodu

Fotointerpretacja obrazów współczynnika rozpraszania

Lindenschmidt i in. (2011) wykorzystali pełnopolarymetryczne dane RADARSAT-2 do rozpoznania głównych typów pokrywy lodowej na rzece Lower Red River (Kanada) w sezonie zimowym 2010-2011. Jako dane referencyjne wykorzystali wyniki pomiarów terenowych opisujące właściwości pokrywy lodowej – szorstkość powierzchni, typ i grubość poszczególnych warstw lodowych – i zalegającego śniegu – szorstkość powierzchni, głębokość, twardość, właściwości dielektryczne. Na pod-

stawie kompozycji barwnych RGB HH HV VV wydzielono cztery klasy pokrywy lodowej o różnej szorstkości, do których następnie przypisano poszczególne typy lodu. Nie wydzielono osobnej klasy dla wody. Została ona ujęta w jedną klasę razem z cienkim lodem termalnym.

W kolejnej publikacji związanej z fotointerpretacją Lindenschmidt i in. (2014) wykorzystują dane RADARSAT-2 do obserwacji wybranych faz występujących w zlodzeniach rzek: faz formowania i rozpadu. Obszarem opracowania w tym przypadku był odcinek Rzeki Niewolniczej (Kanada). Jako dane pomocnicze w fotointerpretacji wykorzystano wyniki pomiarów terenowych. Na podstawie analizy kompozycji barwnych rozpoznano formy pokrywy lodowej takie jak: lód śnieżny, lód termalny, upakowaną pokrywę lodową, zator lodowy i wodę.

Fotointerpretacja składowych dekompozycji Freeman-Durden

Lindenschmidt i in. (2017) wykorzystali dane RADARSAT-2 do wykrywania fragmentów pokrywy lodowej o dużej zawartości pęcherzy powietrza oraz obszarów gdzie występują dwie warstwy lodu, a między nimi woda. Badania te były wykonane dla Rzeki Niewolniczej (Kanada). Wykrycie tych obszarów jest ważne z punktu widzenia bezpieczeństwa transportu po zamrożonych rzekach. Autorzy wykorzystali dekompozycję Freeman – Durden w wyniku której sygnał radarowych rozkładany jest na trzy składowe odpowiadające odbiciu powierzchniowemu, podwójnemu odbiciu oraz odbiciu objętościowemu. Obszary wykryte na podstawie fotointerpretacji porównano z danymi referencyjnymi: zdjęciami z kamer poklatkowych, danymi hydro- i meteorologicznymi. Dla całej pokrywy lodowej zaobserwowano wyższe rozpraszanie powierzchniowe niż objętościowe. Na obszarach gdzie występują pęcherze powietrza odbicie jest większe niż w przypadku obszarów sąsiednich. Autorzy jednak podkreślają, że problem stanowi odróżnienie wysokiego odbicia spowodowanego szorstkością powierzchni od wysokiego odbicia na skutek występowania pęcherzy powietrza. Zaobserwowano, że pęcherze powietrza występują zarówno w lodzie termalnym jak i upakowanej pokrywie lodowej. Na podstawie fotointerpretacji kompozycji barwnych złożonych ze składowych dekompozycji wykryto pęknięcia oraz zalane fragmenty lodu, które prowadzą do powstania podwójnej warstwy lodu.

Analiza z wykorzystaniem parametrów wygenerowanych ze współczynnika rozpraszania

Floyd i in. (2014) analizują serie czasowe w celu monitorowania wiosennego rozpadu pokrywy lodowej na rzece Kuparuk (USA, Alaska). W badaniach wykorzystano 61 danych z satelitów ERS-1 i RADARSAT-1 z lat 2001-2010. Dane radarowe zostały przypisane do jednej z trzech grup odpowiadającym okresom przed rozpadem, w trakcie rozpadu i po rozpadzie pokrywy lodowej. Fragment koryta rzeki, będący obszarem opracowania, podzielono na 10 segmentów. Zaproponowano trzy następujące parametry: jasność segmentu, zmiana

jasności między segmentami, suma zmienności segmentów w kolejnych terminach. Oceny przydatności wybranych parametrów dokonano poprzez porównanie zmian ich wartości w czasie ze zmiennością przepływu wody dla analizowanego fragmentu rzeki spowodowaną rozpadem pokrywy lodowej. Najlepsze wyniki – poprawne rozpoznanie początku i zakończenia rozpadu lodu dla 8 z 9 sezonów zimowych – otrzymano dla parametru opisującego zmianę jasności pomiędzy segmentami tej samej sceny. Parametr ten był stale większy dla obrazów zarejestrowanych podczas rozpadu pokrywy lodowej niż dla obrazów zarejestrowanych wcześniej (gdy rzeka jest całkowicie zamrożona) lub później (gdy rzeka jest wolna od lodu). Zaobserwowano, że jasność segmentów zmienia się w dużym stopniu wraz z kolejnymi obrazami bez widocznego powiązania ze zmianą w morfologii pokrywy. Jako prawdopodobne przyczyny autorzy podają topnienie pokrywy lodowej pod wpływem promieni słonecznych i zmiany w rozkładzie śniegu. Brak odpowiednich danych referencyjnych nie pozwolił potwierdzić tego założenia.

Klasyfikacja k-średnich na podstawie współczynnika rozpraszania i tekstury obrazu

Najprostszą formę automatycznej klasyfikacji zobrażeń radarowych proponują Sobiech i Dierking (2013). Autorzy dokumentują rozpad pokrywy lodowej w delcie Leny (Rosja) wiosną 2011. W procesie klasyfikacji wydzielane są dwie klasy: woda i lód. Wykorzystano sześć scen TerraSAR-X o polaryzacji HH oraz trzy pełnopolarymetryczne sceny RADARSAT-2. Jako metodę klasyfikacji wybrano klasyfikację k-średnich. W przypadku danych RADARSAT-2 każdy kanał klasyfikowano oddzielnie, a następnie porównano wyniki poszczególnych klasyfikacji. Autorzy zbadali także wpływ dwóch filtracji na dokładność wyników klasyfikacji: filtru dolnoprzepustowego zastosowanego przed klasyfikacją oraz domknięcia morfologicznego obrazu po klasyfikacji. Do oceny dokładności użyto obszarów testowych zaznaczonych manualnie na zobrażowaniach radarowych. Oceny przydatności dokonano porównując wizualnie maski lodu wygenerowane z użyciem poszczególnych kanałów polaryzacji. Najlepsze wyniki otrzymano dla polaryzacji HH. W przypadku danych o polaryzacji VV zaobserwowano błędne sklasyfikowanie falującej powierzchni wody jako lodu. Zastosowanie filtru dolnoprzepustowego przed klasyfikacją zwiększało dokładność wyników. Natomiast morfologiczne domknięcie wykonane na obrazach po klasyfikacji skutkowało obniżeniem dokładności – wąskie obszary wody występujące pomiędzy krami były błędnie sklasyfikowane jako lód. Autorzy podkreślają wysokość skuteczności klasyfikacji k-średnich w przypadku danych zarejestrowanych w zmiennych warunkach środowiskowych. Jako główny problem wymieniają klasyfikację mokrego lodu, który zazwyczaj przypisywany jest do klasy wody.

Bardziej rozbudowaną formę algorytmu klasyfikacji k-średnich proponują Gauthier i in. (2010). Algorytm

IceMAP-R wykorzystuje zarówno współczynnik rozpraszania w polaryzacji HH jak i elementy tekstury obrazu. Autorzy analizują 38 scen RADARSAT-1 i RADARSAT-2 z lat 2007-2009 dla rzeki Koksoak (Kanada). W wyniku klasyfikacji otrzymano sześć klas: wodę, gładki lód termalny, płynące pola lodowe (osobne klasy dla luźno i gęsto upakowanych pól), stałą pokrywę lodową z różnych form lodowych (osobne klasy dla luźno i gęsto upakowanej pokrywy). Całkowita dokładność klasyfikacji wyniosła średnio 61%. Po wykluczeniu płynących pól lodowych dokładność wzrosła do 76%. Jako główne wyzwania przy operacyjnym wykorzystaniu algorytmu w fazie formowania pokrywy lodowej autorzy wymieniają klasyfikację falującej wody i śryżu. Natomiast w fazie rozpadu pokrywy lodowej główny problem stanowi klasyfikacja topniejącego śniegu i lodu.

Jasek i in. (2013) testują algorytm IceMAP-R dla rzeki Peace (Kanada). Dane RADARSAT-2 wraz danymi MODIS posłużyły do analizy fazy formowania pokrywy lodowej na odcinku Vermilion Rapids. Wykorzystując możliwości danych pełnopolarymetrycznych zbadano wpływ doboru liczby i typu kanałów polaryzacji na wyniki klasyfikacji. Testowano algorytm IceMAP-R wykorzystując jako dane wsadowe polaryzacje: HH, HV, VV, HH-HV, HH-VV, HH-HV-VV. Zaobserwowano znaczny wzrost dokładności klasyfikacji dla polaryzacji HH-HV. Otrzymano całkowitą dokładność klasyfikacji średnio na poziomie 92% przy wydzieleniu klas: woda, lód termalny, pokrywa lodowa z różnych form o dwóch stopniach upakowania. Nowy algorytm obniżył błąd niedoszacowania średnio o 11%, a błąd przeszacowania średnio o 3% względem oryginalnego algorytmu opartego na polaryzacji HH. Żadna z kombinacji polaryzacji nie pozwoliła na odróżnienie silnie wzburzonej wody (kaskady, wodospad) od lodu. Jako główne problemy w klasyfikacji autorzy podają rozróżnienie pomiędzy spokojną wodą i gładkim lodem termalnym, a także rozróżnienie między krawędziami pól lodowych i śryżem. Współczynnik odbicia dla krawędzi pól lodowych i śryżu przyjmuje podobną wartość jednak w każdym przypadku inny parametr pokrywy lodowej decyduje o jego wysokości. W przypadku pól lodowych parametrem determinującym rozpraszanie jest szorstkość powierzchni. Natomiast w przypadku śryżu głównym czynnikiem jest występowanie pęcherzyków powietrza.

Chu i in. (2015, 2016) także wykorzystali klasyfikację k-średnich opartą na współczynniku rozpraszania oraz elementach tekstury. Obszarem testowym była Rzeka Niewolnicza (Kanada). W odróżnieniu od podejścia opisanego w Jasek i in. (2013), mimo pozyskania danych RADARSAT-2 w różnych wariantach polaryzacji, wykorzystano tylko dane z kanału HH. Wybrano cztery klasy: woda, lód termalny, pokrywa lodowa z różnych form o stosunkowo gładkiej i o szorstkiej powierzchni. Wartości całkowitej dokładności klasyfikacji różniły się w zależności od terminu i odcinka rzeki i wynosiły: 67%, 72%, 73%, 84%. Tak jak poprzednio (Jasek i in., 2013) problem stanowiło rozróżnienie spokojnej wody i gładkiego cienkiego lodu. Natomiast poprawnie skla-

syfikowano wzburzoną wodę. Autorzy podają, że było to możliwe dzięki wykorzystaniu elementów tekstury obrazu. Jako przyczynę zmienności dokładności klasyfikacji dla poszczególnych odcinków rzeki oraz różnych terminów autorzy podają zmiany w warunkach środowiskowych, takie jak: opad śniegu, zmienność morfologii w obrębie tych samych typów pokrywy lodowej, zmiany warunków przepływu.

Analiza parametrów polarymetrycznych i niepolarymetrycznych

Van der Sanden i Drouin (2011) badają wybrane parametry polarymetryczne i niepolarymetryczne, takie jak: współczynnik rozpraszania w różnych polaryzacjach liniowych i kołowych, ilorazy współczynnika rozpraszania dla wybranych polaryzacji, różnica faz polaryzacji, koherencja, składowe dekompozycji Pauliego, składowe dekompozycji Freemana, składowe dekompozycji Cloude i Pottier, składowe dekompozycji Touziego. Obszarem opracowania była w tym przypadku rzeka Mackenzie (Kanada). W badaniach wykorzystano dane RADARSAT-2 i ALOS PALSAR. Każdy z wybranych parametrów przetwarzany był osobno. Do oceny przydatności poszczególnych danych i parametrów wykorzystano, tzw. potencjał klasyfikacyjny, który określono jako stosunek zmienności pomiędzy klasami do sumy zmienności w poszczególnych klasach. Wybrano trzy klasy: lód termalny, śryż, upakowaną pokrywę lodową. Dla 13 z 16 badanych parametrów otrzymano większą wartość potencjału klasyfikacyjnego dla danych RADARSAT-2 niż dla danych ALOS PALSAR. Dane ALOS PALSAR okazały się mniej przydatne do rozróżniania lodu termalnego i śryżu. Jako uzasadnienie autorzy podają, że dłuższa fala jest mniej wrażliwa na obecność pęcherzyków powietrza, które stanowią podstawę do odróżnienia tych dwóch typów lodu. Porównując wyniki klasyfikacji pomiędzy różnymi parametrami stwierdzono, że najlepsze wyniki otrzymano stosując składową dekompozycję Pauliego określającą podwójne odbicie wiązki. Analizując wyniki klasyfikacji współczynnika rozproszenia wstecznego w poszczególnych polaryzacjach wykazano, że polaryzacje kołowe dały lepsze rezultaty niż polaryzacje liniowe. Z kanałów o polaryzacji liniowych najlepsze wyniki otrzymano dla polaryzacji HV. Analogiczne badania w fazie powstawania pokrywy lodowej na rzece Mackenzie (Kanada) (Van der Sanden i Drouin, 2011) wykazały, że iloraz współczynnika rozpraszania w kanałach VV i HH stanowi dobry wskaźnik wyznaczenia powstania pokrywy lodowej. Autorzy podają, że wskaźnik ten zmienia znak z dodatniego na ujemny gdy rzeka zaczyna zamarzać.

Klasyfikacja nadzorowana Wisharta

Mermoz i in. (2014) wykorzystali pełnopolarymetryczne dane RADARSAT-2 do klasyfikacji pokrywy lodowej na rzekach Świętego Franciszka, Koksoak, Mackenzie (Kanada). Wybrano cztery klasy: wodę, czysty lód termalny, upakowaną pokrywę lodową i śryż.

Wykorzystano klasyfikację nadzorowaną Wisharta. Średnia dokładność producenta wyniosła 99,1%, a średnia dokładność użytkownika 90,8%. Współczynnika kap-pa otrzymano na poziomie 0,97.

Inny przykład klasyfikacji pokrywy lodowej z wykorzystaniem klasyfikacji Wisharta podaje Łoś i in. (2016 a). W tym przypadku obszar opracowania obejmował fragment dolnej Wisły (Polska). Celem badań było porównanie przydatności danych o czterech kanałach polaryzacji i danych o dwóch kanałach polaryzacji (w różnych zestawieniach kanałów). Pozyskano cztery pełnopolarymetryczne sceny RADARSAT-2. Jako dodatkowe dane wykorzystano pomiary pokrywy lodowej w przekrojach oraz zdjęcia naziemne. Wydzielono cztery następujące klasy: gładki lód termalny, pokrywa lodowa zbudowana z różnych form lodowych o różnym stopniu upakowania (średnim i dużym). Dla danych z czterech dat otrzymano wysoką dokładność klasyfikacji – powyżej 94%. Dla jednego zestawu danych dokładność była niższa i wynosiła 86%. Porównując różne kombinacje kanałów polaryzacji w poszczególnych datach nie zauważono znaczących różnic. Różnice całkowitej dokładności klasyfikacji nie przekraczały 2%. Na podstawie otrzymanych wyników autorzy stwierdzili, że dane o dwóch kanałach polaryzacji dostarczyły tyle samo informacji o pokrywie lodowej co dane o czterech kanałach polaryzacji.

Ponownie wykorzystano klasyfikację Wisharta do badania pokrywy lodowej na rzece Peace (Kanada) (Łoś i in., 2016). W tym przypadku głównym celem było porównanie możliwości jakie w klasyfikacji pokrywy lodowej dostarczają dane w pasmach X i C. Pozyskano trzy sceny TerraSAR-X oraz trzy sceny RADARSAT-2. Różnica między czasem rejestracji pary danych TerraSAR-X – RADARSAT-2 nie przekraczała dwóch dni. Klasyfikację nadzorowaną Wisharta wykorzystano do wydzielenia sześciu klas: wody, lodu inicjalnego (3 klasy zależnie od stopnia stłoczenia pól lodowych), śryżu i upakowanej pokrywy zbudowanej z różnych form lodowych. Otrzymano wysoką całkowitą dokładność klasyfikacji 81% - 89%. Nie zaobserwowano znaczących różnic między wynikami klasyfikacji otrzymanymi z danych TerraSAR-X i RADARSAT-2. Ponadto zaobserwowano podobne problemy w obydwu pasmach: błędy w klasyfikacji pomiędzy klasami lodu inicjalnego i wody, a także błędne klasyfikowanie granic pól lodu inicjalnego jako śryżu. Na podstawie otrzymanych wyników autorzy stwierdzili, że dane TerraSAR-X i RADARSAT-2 wykazały tę samą przydatność przy klasyfikacji pokrywy lodowej na badanym odcinku rzeki Peace.

Analiza z wykorzystaniem interferometrii radarowej

Van der Sanden i in. (2013) badają możliwość wykorzystania interferometrii radarowej w wykrywaniu zmian o małej skali. W analizie wykorzystano dane COSMO-SkyMed (trzy sceny) oraz RADARSAT-2 (dwie sceny). Wygenerowano interferogramy o różnym odstępie czasowym: 1, 3, 4 dni w przypadku danych COSMO-SkyMed oraz 24 dni dla danych RADARSAT-2. Niską

wartość koherencji w przypadku danych RADARSAT-2 autorzy tłumaczą przyrostem grubości pokrywy lodowej. Natomiast w przypadku interferogramów wygenerowanych z danych COSMO-SkyMed, o bardzo małych odstępach czasowych, jako możliwe przyczyny niskiej koherencji autorzy podają powstanie pęcherzy powietrza na spodzie pokrywy lodowej oraz poziome i pionowe przemieszczenie się form lodowych. Na podstawie wyników analiz stwierdzono, że dane COSMO-SkyMed nie są optymalne do badania pokrywy lodowej przy wykorzystaniu technik interferometrii radarowej. Lepsze wyniki są spodziewane wraz z danymi z Radarsat Constellation Mission.

5. Szacowanie grubości lodu

Lindenschmidt i in. (2011) wykonali fointerpretację danych RADARSAT-2 pod kątem oceny grubości pokrywy lodowej na rzece Red River (Kanada). W analizie wykorzystano terenowe pomiary z wykorzystaniem radaru penetrującego lód. Autorzy nie przeprowadzają oceny ilościowej. Podkreślają jednak przydatność danych SAR w badaniach grubości lodu.

Van der Sanden i Drouin (2011) badali grubość lodu na rzece Mackenzie (Kanada) z wykorzystaniem danych RADARSAT-2 i ALOS PALSAR. Jako dane referencyjne wykorzystano wyniki pomiarów terenowych opisujące parametry śniegu i lodu w 22 miejscach. Dane satelitarne zostały pozyskane w trybie pełnopolarymetrycznym. Do szacowania grubości wykorzystano wybrane parametry polarymetryczne i niepolarymetryczne. Obliczono współczynnik determinacji regresji liniowej pomiędzy pomiarami terenowymi a szacowaniem grubości pokrywy lodowej na podstawie wybranych parametrów. Szacowanie grubości przeprowadzono osobno dla każdej z trzech klas: lodu termalnego, śryżu i zbitą pokrywą lodową. Otrzymano różnice pomiędzy wartościami współczynników determinacji dla danych z obydwu sensorów. Gdy brano pod uwagę wszystkich trzy klasy zauważono, że dane ALOS PALSAR dostarczają lepszych wyników. Natomiast gdy porównywano tylko klasy lodu termalnego i śryżu wyniki przetwarzania danych RADARSAT-2 i ALOS były podobne. Jednak w żadnym przypadku współczynnik determinacji nie przekroczył wartości 0,7. Autorzy podkreślają, że różnorodność danych referencyjnych pod względem grubości lodu była ograniczona (70 – 105 cm). We wnioskach autorzy stawiają hipotezę, że zmiana struktury lodu ma prawdopodobnie większy wpływ na wartość współczynnika rozpraszania niż grubość lodu.

Mermoz i in. (2014) szacowali grubość pokrywy lodowej dla rzek Świętego Franciszka, Koksoak, Mackenzie (Kanada). Wykorzystali pełnopolarymetryczne dane RADARSAT-2 oraz terenowe pomiary grubości lodu w 70 punktach. Do szacowania grubości wykorzystano parametry polarymetryczne wygenerowane na podstawie macierzy kowariancji: entropię, anizotropię i kąt alfa. Autorzy podają charakterystykę polarymetryczną cien-

kiego i grubego lodu (odpowiednio poniżej 60 cm i powyżej 60 cm grubości). Charakterystyka zawiera wartości średnie oraz odchylenie standardowe dla współczynnika rozpraszania w polaryzacjach HH i HV, entropię, kąt alfa. Najlepsze wyniki szacowania otrzymano dla regresji nieliniowej wykorzystującej entropię. Współczynnik determinacji otrzymano na poziomie 0,85. Błąd średniokwadratowy szacowania grubości wyniósł 9,2 cm, co stanowiło 16,6% grubości średniej grubości pokrywy. Autorzy zalecają sprawdzenie stabilności modelu przez jego testowanie na innych obszarach badawczych.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono przekrój najnowszych badań nad wykorzystaniem satelitarnych danych SAR w analizach pokrywy lodowej. Przedstawione badania można podzielić na trzy główne kierunki: zależność między typem lodu a wartością rozproszenia wstecznego, rozpoznawanie i klasyfikacja form lodowych, szacowanie grubości lodu. Najwięcej badań związanych jest z rozpoznawaniem i klasyfikacją form pokrywy lodowej.

Dwie metody klasyfikacji były najczęściej wykorzystywane: klasyfikacja k-średnich wykorzystująca współczynnik rozpraszania (Sobiech i Dierking, 2013) i elementy tekstury obrazu (Chu i in., 2015, 2016; Gauthier i in., 2010; Jasek i in., 2013) oraz klasyfikacja nadzorowana Wisharta (Łoś i in., 2016 a, b; Mermoz i in., 2014). Dalekosiężnym celem prezentowanych badań jest opracowanie metody, która będzie mogła być wykorzystana w sposób operacyjny. W tym kontekście obydwa podejścia – klasyfikacja k-średnich i klasyfikacja nadzorowana Wisharta – mają mocne i słabe strony. Brak stałych wartości progowych w klasyfikacji k-średnich sprawia, że model nie jest wrażliwy na małe zmiany w obrębie poszczególnych form lodowych (Sobiech i Dierking 2013). Mogą to być zmiany związane z niewielkim przyrostem grubości, małą zmianą morfologii, opadem śniegu. Pewnym ograniczeniem jest stała liczba klas. Można się spodziewać błędów w wynikach klasyfikacji danych pozyskanych w terminie gdy jedna z zadeklarowanych klas nie będzie występować. Może być to, np. woda w okresie gdy koryto rzeki w zupełności pokryte jest lodem. Klasyfikacja nadzorowana Wisharta wymaga pól treningowych. Pozyskiwanie ich dla każdego zestawu danych SAR jest czasochłonne, a więc stanowi przeszkodę w operacyjnym wykorzystaniu modelu. Pewne rozwiązanie stanowi wykorzystanie stałych wzorców klas. Jednak w tym przypadku powstaje pytanie czy będą one odpowiednie do klasyfikacji danych z różnych terminów, gdy poszczególne formy lodowe ulegną zmianom.

Z pewnością badania nad opracowaniem modelu klasyfikacji pokrywy lodowej, który mógłby być stosowany w sposób operacyjny są głównym trendem w obecnych i przyszłych badaniach. Ze względu na duże zmienności pomiędzy pokrywami lodowymi występującymi na różnych rzekach (także na poszczególnych odcinkach rzek), należy się spodziewać, że modele będą opracowy-

wane osobno z uwzględnieniem specyfiki każdej z rzek. Opracowanie uniwersalnego modelu wydaje się mało prawdopodobne.

Kolejnym kierunkiem badań, którego można się spodziewać, jest wykorzystanie danych Sentinel-1. Głównymi argumentami są w tym przypadku: częsty okres rewizyty (3 dni dla umiarkowanych szerokości geograficznych) oraz nieodpłatne udostępnianie danych. Ponadto należy pamiętać, że Sentinel-1 wykorzystuje to samo pasmo promieniowania elektromagnetycznego co RADARSAT-2. Oznacza to, że np. algorytmy k-średnich prezentowane u Chu i in. (2015, 2016), Gauthier i in. (2010), Jasek i in. (2013), które zostały opracowane na podstawie danych RADARSAT-2 powinny być łatwo transferowalne na dane Sentinel-1.

Można się także spodziewać wzrostu liczby badań dla obszarów opracowania w Polsce, szczególnie dla Wisły i Odry. Badania prezentowane u Łoś i in. (2016 b) potwierdziły, że dane SAR mogą być z powodzeniem wykorzystywane w naszym kraju. Rozdzielczość przestrzenna jest wystarczająca do monitorowania sytuacji lodowej na najszerszych polskich rzekach.

Literatura

- Chu, T., Das, A., Lindenschmidt, K. E. (2015). Monitoring the variation in ice-cover characteristics of the Slave River, Canada using RADARSAT-2 data—A case study. *Remote Sensing*, 7(10), 13664-13691.
- Chu, T., Lindenschmidt, K. E. (2016). Integration of space-borne and air-borne data in monitoring river ice processes in the Slave River, Canada. *Remote Sensing of Environment*, 181, 65-81.
- Duguay, C. R., Bernier, M., Gauthier, Y., Kouraev, A. (2015). Remote sensing of lake and river ice. *Remote sensing of the cryosphere*, 273-306.
- Floyd, A. L., Prakash, A., Meyer, F. J., Gens, R., Liljedahl, A. (2014). Using synthetic aperture radar to define spring breakup on the Kuparuk river, northern Alaska. *Arctic*, 462-471.
- Gauthier, Y., Tremblay, M., Bernier, M., Furgal, C. (2010). Adaptation of a radar-based river ice mapping technology to the Nunavik context. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(sup1), S168-S185.
- Gherboudj, I., Bernier, M., Leconte, R. (2010). A backscatter modeling for river ice: Analysis and numerical results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(4), 1788-1798.
- Jasek, M., Gauthier, Y., Poulin, J., Bernier, M. (2013). Monitoring of freeze-up on the Peace River at the Vermilion Rapids using RADARSAT-2 SAR data. In *Proceedings of the 17th Workshop on River Ice, Edmonton, Alberta* (ss. 21-24).
- Lindenschmidt, K. E., Van der Sanden, J. J., Demski, A., Drouin, H., Geldsetzer, T. (2011). Characterising river ice along the Lower Red River using RADARSAT-2 imagery. In *Proceedings of the 16th Workshop on River Ice, Winnipeg, MB* (ss. 18-22).
- Lindenschmidt, K. E., Das, A., Sagin, J. (2014). The importance of RADARSAT-2 imagery in monitoring river ice cover characteristics and behaviour. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International* (ss. 1186-1189). IEEE.

- Lindenschmidt, K. E., Das, A., Chu, T. (2017). Air pockets and water lenses in the ice cover of the Slave River. *Cold Regions Science and Technology*, 136, 72-80.
- Łoś, H., Pawłowski, B., Osińska-Skotak, K., Pluto-Kossakowska, J. (2016). Comparison of Quad-Polarimetric and Dual-Polarimetric SAR Data Capabilities for River Ice Classification. In *Living Planet Symposium* (Vol. 740, ss. 331-335).
- Łoś, H., Osińska-Skotak, K., Pluto-Kossakowska, J., Bernier, M., Gauthier, Y., Jasek, M., Roth, A. (2016). Comparison of C-band and X-band polarimetric SAR data for river ice classification on the Peace River. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- Mermoz, S., Allain-Bailhache, S., Bernier, M., Pottier, E., Van Der Sanden, J. J., Chokmani, K. (2014). Retrieval of river ice thickness from C-band PolSAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(6), 3052-3062.
- Sobiech, J., Dierking, W. (2013). Observing lake-and river-ice decay with SAR: advantages and limitations of the unsupervised k-means classification approach. *Annals of Glaciology*, 54(62), 65-72.
- Van der Sanden, J. J., Drouin, H. (2011). Satellite SAR observations of river ice cover: A RADARSAT-2 (C-band) and ALOS PALSAR (L-band) comparison. In *Proceedings of the 16th Workshop on River Ice, Winnipeg, MB* (ss. 18-22).
- Van der Sanden, J. J., Drouin, H., Bian, Y. (2013). Repeat pass InSAR observations of river and lake ice cover: a preliminary evaluation of information content. In *Proceedings of the 17th Workshop on River Ice, Edmonton, Alta* (ss. 258-271).



mgr inż. **Helena ŁOŚ** - Doktorantka na Wydziale Geodezji i Kartografii Politechnice Warszawskiej, gdzie także pracuje na stanowisku asystenta naukowo-dydaktycznego w Zakładzie Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej. Absolwenta programu Young Graduate Trainee Europejskiej Agencji Kosmicznej. W ramach doktoratu prowadzi badania nad możliwością wykorzystania satelitarnych danych SAR o różnych parametrach w monitorowaniu zjawisk lodowych na rzekach.