

BIBLIOGRAFIA

- Ashton G.D. (red.), 1986, River and lake ice engineering: Littleton, Colorado, Water Resources Publications.
- Atwood D.K., Gunn G. E., Roussi C., Wu J., Duguay C., Sarabandi K., 2015, Microwave Backscatter from Arctic Lake Ice and Polarimetric Implications. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 53, 5972–5982.
- Bączyk A., Suchożebrski J., 2016, Zmienność przebiegu zjawisk lodowych na Bugu w latach 1903–2012. *Inżynieria Ekologiczna*, 49, 136–142.
- Beltaos S., Gerard R., Petryk S., Prowse T.D., 1990, Workong group on river ice jams. Field studies and research needs. National Hydrology Research Institute, Saskatchewan.
- Beltaos S., 1997, Onset of river ice breakup: *Cold Regions Science and Technology*, 25, 3, 183–196.
- Beltaos S., 2000, Advances in river ice hydrology. *Hydrological Processes*, 14, 1413–1625.
- Beltaos S. (red.), 2013, River ice formation. Committee on River Ice Processes and the Environment, Canadian Geophysical Union Hydrology Section, Edmonton, Alberta, Canada
- Beltaos S., Prowse T., 2009, River – ice hydrology in a shrinking cryosphere. *Hydrological Processes* 23/1, 22–144.
- Brański J., 2003, Transport rumowiska. [w:] Dojlido J., Gromiec M. (red.) *Rzeka Bug – zasoby wodne i przyrodnicze*, IMGW, Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania, Warszawa, 72–80.
- Brański J., Banasik K., 1996, Sediment yields and denudation rates in Poland [w:] *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives (Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996)*. IAHS Publ. no. 236, 133–138.
- Dojlido J., Gromiec M., 2003, *Rzeka Bug – zasoby wodne i przyrodnicze*, IMGW, Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania, Warszawa.
- Duguay C. R., Pultz T. J., Lafleur P. M., Drai D., 2002, RADARSAT Backscatter Characteristics of Ice Growing on Shallow Sub-Arctic Lakes, Churchill, Manitoba, Canada. *Hydrol. Process.* 16, 1631–1644.
- European Environment Agency (EEA), 2012, Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. Copenhagen.
- ESA, 2012, Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services (ESA SP-1322/1, March 2012)
- Flipponi F., 2019, Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow” [w:] 3rd International Electronic Conference on Remote Sensing (ECRS 2019), 22 May–5 June 2019; Sciforum Electronic Conference Series, Vol. 3.
- Gauthier Y., El Battay A., Bernier M., Ouarda T.B.M.J., 2003, An approach using contextual analysis to monitor river ice from RADARSAT. 60 th Eastern Snow Conference, Canada, 151–158.
- Gauthier Y., Weber F., Savary S., Jasek M., Paquet L.M., Bernier M., 2006, A combined classification scheme to characterise river ice from SAR data. *EARSeL Proceedings* 5, 1, 77–88.
- Gauthier, Y., Paquet, L.-M., Gonzalez, A., and Bernier, M., 2008, Using radar and GIS to support ice related flood forecasting *Geomatica* 62, 273–285.
- 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(1), 168–185.
- Geldsetzer T., van der Sanden J., Brisco B., 2010, Monitoring Lake Ice During Spring Melt using RADARSAT-2 SAR. *Can. J. Remote Sens.* 36, 391–400.
- Gólek J., 1964, Złodzenie rzek polskich. *Prace PIHM z.* 64, Warszawa
- Gólek J., 1994, Zjawiska lodowe. [w:] *Atlas Rzeczypospolitej Polskiej*. IGiPZ PAN, PPWK, Warszawa.
- Gorzowska A., 2011, Procesy sedymentacji w Jeziorze Zegrzyńskim, Zakład Hydrologii WGSU UW, maszynopis.
- Grześ M., 1991, Zatory i powódzie zatorowe na dolnej Wiśle: mechanizmy i warunki. *Polska Akademia Nauk, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania*, Warszawa.
- Gunn G. E., Duguay C. R., Atwood D. K., King, J., Toose P., 2018, Observing Scattering Mechanisms of Bubbled Freshwater Lake Ice Using Polarimetric RADARSAT-2 (C-Band) and UW-Scat (X- and Ku-Bands). *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 56, 2887–2903.
- Jachna K., 2015, Zmiany form korytowych i koryta w ujściowym odcinku Bugu. Zakład Hydrologii WGSU UW, maszynopis.
- Jeffries M.O., Morris K., Duguay C.R., 2012, Floating ice: lake ice and river ice [w:] Williams R.S., Ferrignion J.G. (red.) *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World – State of the Earth's Cryosphere at the Beginning of the 21st Century: Glaciers, Global Snow Cover, Floating Ice, and Permafrost and Periglacial Environments* Edition: Professional Paper 1386-A Chapter: A-4-II. U.S. Geological Survey.

- Jasek M., Weber F., Hurley J., 2003, Ice thickness and roughness analysis on the Peace River using RADARSAT-1 SAR imagery. [w:] 12th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Canadian Geophysical Union Hydrology Section (CGU HS) Committee on River Ice Processes and the Environment, 19–20.
- de Jong S. M., van der Meer F. D., 2004, Remote Sensing Image Analysis Including the Spatial Domain, Wydawnictwo Springer, str 1–16.
- Kolerski T., 2016, Modelowanie matematyczne zjawisk lodowych na wodach śródlądowych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
- Kornijów R., Karpowicz M., Ejsmont-Karabin J., Nawrocka L., de Eyto E., Grzonkowski K., Magnuszewski A., Jakubowska A., Wodzinowski T., Woźniczka A., 2020, Patchy distribution of phyto- and zooplankton in large and shallow lagoon under ice cover and resulting trophic interactions. *Marine and Freshwater Research*, 71(10) 1327–1341. <https://doi.org/10.1071/MF19259>
- Kosicki A., Sakowicz M., 2004, Stopień Wodny Dębe, Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Warszawie, Zakład Energetyczny Warszawa – Teren S.A.
- Łoś H.M., 2017, Badanie wpływu polaryzacji i częstotliwości danych satelitarnych SAR na dokładność określania zasięgu i struktury zjawisk lodowych na rzekach. Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii. Warszawa.
- Magnuson J. J., Robertson D. M., Benson B. J., Wynne R. H., Livingstone D. M., Arai T., Assel R. A., Barry R. G., Card V., Kuusisto E., Granin N. G., Prowse T. D., Stewart K. M., Vuglinski V. S., 2000, Historical Trends in Lake and River Ice Cover in the Northern Hemisphere. *Science*, 289, 1743–1746.
- Magnuszewski A., 2014, Procesy korytowe w Jeziorze Zegrzyńskim. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, z. XX, 299–306.
- Magnuszewski A., 2018, Application of satellite Sentinel-1 radar images for description of ice phenomena on Dębe reservoir. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectionis*, 17 (4), 121–130.
- Magnuszewski A., Sabat A., Jarościńska A., Sławik Ł., 2018, Application of the AISA hyperspectral image for verification of sediment transport results obtained from CCHE2D hydrodynamic model – Zegrze Reservoir case study, Poland. [w:] Kalinowska M., Mrokowska M., Rowiński P. (Eds.) *Free Surface Flows and Transport Processes 36th International School of Hydraulics* Springer International Publishing, New York, 103–112.
- Majewski W., 1987, Wpływ pokrywy lodowej na charakterystykę hydrauliczną zbiorników przepływowych na rzekach nizinnych na przykładzie Zbiornika Włocławek, Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku.
- Majewski W., 2009, Przepływ w kanałach otwartych z uwzględnieniem zjawisk lodowych. IMGW, Warszawa.
- Michalczyk Z., Sobolewski W., 2002, Charakterystyka hydrologiczna dorzecza Bugu [w:] *Annales Universitatis Mariae Curie- Skłodowska, Sectio B*, 62, 7.
- Michel B., Ramseier R., 1971, Classification of river and lake ice. *Canadian Geotechnical Journal*, 8, 1, 36–45.
- Mierkiewicz M., Sasim M., 2003, Warunki formowania się odpływu – powódzie i susze. [w:] J. Dojlido i in. (red.) *Rzeka Bug zasoby wodne i przyrodnicze*. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania, Warszawa, 56–71.
- Murfitt J., Duguay C.R., 2020, Monitoring ice phenology of the world’s largest high arctic lake using high-density time series analysis of Sentinel-1 data. *Remote Sens.*, 2020, 12, 382.
- Nawalany M., 1999, Opracowanie komputerowego modelu ekosystemu wodnego Zbiornika Zegrzyńskiego, Instytut Systemów Inżynierii Środowiska PW, Warszawa, maszynopis.
- Nghiem S.V., Leshkevich G.A., 2007, Satellite SAR Remote Sensing of Great Lakes Ice Cover, Part 1. *Ice Backscatter Signatures at C Band*. *Journal of Great Lakes Research*, 33(4), 722–735.
- Niedbała J., Ceran M., Dominikowski M., 2012, Określenie warunków przejścia wielkich wód w rzekach regionu wodnego Wisły środkowej z uwzględnieniem wielkości przepływów charakterystycznych w profilu Zawichost. IMGW, Warszawa, maszynopis.
- Paślowski Z., 1970, Wpływ zjawisk lodowych na przepływ rzeczny. *Prace PIHM* 99.
- Pawłowski B., 2015, Determinants of change in the duration of ice phenomena on the Vistula River in Toruń. *J. Hydrol. Hydromech.*, 63, 2, 145–153.
- Pawłowski B., 2017, Przebieg zjawisk lodowych dolnej Wisły w latach 1960–2014. Wydawnictwa Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. Toruń
- Pawłowski B., Gorączko M., Szczerbińska A., 2017, Zjawiska lodowe na rzekach Polski. [w:] Jokieli P., Marszelewski W., Pociask-Karteczka J. (red.) *Hydrologia Polski*, PWN, Warszawa.
- Prowse T.D., Beltaos S., 2002, Climatic control of river-ice hydrology: a review. *Hydrological Processes*. 16, 805–822.

-
- Sabat-Tomala A., Jarocińska A.M., Zagajewski B., Magnuszewski A.S., Sławik, Ł. M. Ochtyra A., Raczko E. & Lechnio J.R., 2018, Application of HySpex hyperspectral images for verification of a twodimensional hydrodynamic model, *European Journal of Remote Sensing*, 51:1, 637–649, DOI: 10.1080/22797254.2018.1470905
- Skibiński J., 1976, Próba ilościowej oceny intensywności transportu rumowiska wleczonego w rzekach środkowej Polski. *Zeszyty Naukowe SGGW AR 74*.
- Tamoń U., 2012, Stopień Wodny Dębe – zbiornik wielofunkcyjny. *Technologia Wody*, 1, 48–52.
- Tsang G., 1982, Frazil and anchor ice. National Water Research Institute, Canada.
- Weber F., Nixon D., Hurley J., 2003, Semi-automated classification of river ice types on the Peace River using RADARSAT-1 synthetic aperture radar (SAR) imagery. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30, 1, 11–27.
- Wojnowski J., 2001, *Wielka encyklopedia PWN*. Wydawnictwo naukowe PWN.
- Ziółkowski D., Woźniak E., 2009, Metoda redukcji plamkowania na obrazach radarowych za pomocą dwustopniowego filtra warunkowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 20, 469–476.

Streszczenie

Praca przedstawia możliwości wykorzystania satelitarnych obrazów radarowych Sentinel-1 do rozpoznawania zjawisk lodowych na Jeziorze Zegrzyńskim. Jezioro Zegrzyńskie jest sztucznym zbiornikiem, który powstał w wyniku przegrodzenia stopniem wodnym Narwi. Jest to zbiornik wykorzystywany dla celów energetyki wodnej, a także zaopatrzenia w wodę Warszawy. Najwyższy poziom piętrzenia Narwi przez stopień Dębe wynosi 7,10 m, przeciętnie piętrzenie to około 6,8 m. Cofka Jeziora Zegrzyńskiego sięga na Narwi w rejon Pułtuska – km 63,3, a na Bugu do miejscowości Popowo – km 17,0. Jezioro ma objętość 89,9 hm³, powierzchnię 33 km², długość około 40 km, przy średniej głębokości 2,86 m oraz długość brzegów 219 km. Dorzecze zamknięte stopniem w Dębe ma powierzchnię 69,7 tys. km². Średni wieloletni przepływ z 1951–2010 wynosi w profilu Narew/Zambski Kościelne 139 m³·s⁻¹ oraz Bug/Wyszaków 162 m³·s⁻¹. Czas wymiany wody w zbiorniku jest krótki i wynosi 3–4 dni. Na podstawie danych z lat 1961–1990 ustalono że wielkość transportu rumowiska unoszonego w profilu Wyszaków na Bugu zawiera się w granicach 153.000–24.500 Mg·rok⁻¹, a dla Narwi w profilu Ostrołęka wielkość transportu zawiesiny jest znacznie mniejsza wynosi bowiem 31.300 Mg·rok⁻¹. Wskaźnik denudacji obliczony na podstawie danych w lat 1951–1990 w przypadku Narwi profil Ostrołęka wynosi on 1,4 Mg·rok⁻¹·km², dla Bugu w profilu Wyszaków sięga on 3,2 Mg·rok⁻¹·km².

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

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

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

IDENTIFICATION OF ICE PHENOMENA ON ZEGRZE RESERVOIR WITH THE USE OF RADAR SATELLITE IMAGES

Abstract

In the study it was examined possibility of using satellite radar images from Sentinel-1 mission in detecting and recognition of ice phenomena at Zegrze Reservoir. Zegrze Reservoir was created by damming Narew river. It is used for electric energy production and water supply of Warsaw. Maximum head at the dam in Dębe is 7.10 m, on average it is about 6.8 m. Back water of the Zegrze reservoir reach Pultusk town Narew river – km 63.3, and on Bug river to Popowo village – km 17.0. Reservoir has a volume of 89.9 hm³, area 33 km², length about 40 km, average depth 2.86 m, coast line is 219 km long. Zegrze reservoir is supplied by tree rivers Bug, Narew, Rządza and Żerań Canal. Catchment area closed by the Dębe dam is 69.7 thousand km². Long term (years 1951–2010) average discharge of Narew river at Zambski Kościelne gauge is 139 m³·s⁻¹, and of Bug river at Wyszaków gauge is 162 m³·s⁻¹. Reservoir retention time is short equal 3–4 days. Data from years 1961–1990 of suspended sediment measurements have shown that Bug river in Wyszaków gauge suspended sediment transport is in the range 153,000–24,500 Mg·year⁻¹, while at Narew river – Ostrołęka gauge is much smaller – 31,300 Mg·year⁻¹. Denudation rate calculated for the period of years 1951–1990 at Narew river – gauge Ostrołęka is 1.4 Mg·year⁻¹·km², and at Bug river – Wyszaków gauge is 3.2 Mg·year⁻¹·km². To understand the reservoir hydrology it had been used a two-dimensional hydrodynamic model CCHE2D. Results of hydrodynamic modeling shows that Bug river carry a high concentration flux of suspended sediment which enters main part of the reservoir and then is a subject of sedimentation and dilution. Water from Narew river at the confluence with Bug river do not mix and currents of both rivers flow parallel only in lacustrine part of the reservoir there are good conditions for mixing under the influence of waves and wind drift. This pattern of current was confirmed by hyperspectral images recorded with the use of AISA i HySpex aerial scanners. Pattern of parallel streams of Narew and Bug rivers which do not mix with each other is often observed at multispectral images, for example Sentinel-2 image recorded on 31 VIII 2017. Transport of sediments and mixing of water from Narew and Bug rivers is influenced by the wind field which disturbs flow lines especially in lacustrine part of the reservoir. In the hydrodynamic model CCHE2D it was simulated an influence of wind field of cardinal directions N, S, W, E and force 1 m·s⁻¹. In case of wind direction S, W, E in both lacustrine basins it can form circulation. This circulation pattern is important in case of sediment transport and frazil ice flow as well as in the phase of ice break-up. Still the main current in the old Narew river thalweg is maintained. In case of N wind the main current is shifted toward southern coast of the reservoir and shaped by the geometry of small and large lacustrine basins. Ice phenomena definitions and run on inland waters of Poland was presented. Field examples were used in description of different ice forms. New source of remote sensing data are satellite SAR Sentinel-1 images. GRDH and SLC products were converted to color composite. On the images from Winter of 2018 following ice classes were identified: free water, shore ice, frazil ice, ice cover, consolidated ice. Back scatter values were compared for these classes using images of GRDH and SLC products. On the example of Bug river it was tested use of GRDH product images for creation of ice reports and use of the information on ice jam location on hydrological measurements of water stages. In case of Sentinel-1 images better information brings GRDH product. It has a lower memory volume and is easy in processing. In RGB

composition it is possible in a short time obtain overview of ice cover on a long reach of the rivers and reservoir. SLC product has higher spatial resolution but due to the process of image processing with the use of speckle reduction filters the image was less clear.

Key words: Zegrze Reservoir, Bug, Narew, ice phenomena, satellite images, SAR, Sentinel-1