

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 51, 2011: 15–26
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 51, 2011)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 51, 2011: 15–26
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 51, 2011)

Tomasz BEREZOWSKI, Jarosław CHORMAŃSKI

Katedra Inżynierii Wodnej SGGW w Warszawie
Department of Hydraulic Engineering WULS – SGGW

Analiza możliwości wykorzystania zdjęć satelitarnych w celu pozyskania informacji o przestrzennym rozmieszczeniu pokrywy śnieżnej jako parametru w modelu opad-odpływ

Analysis of use of satellite imagery for extraction of snow cover distribution as a parameter in a rainfall-runoff model

Słowa kluczowe: MODIS, pokrywa śnieżna, model hydrologiczny, teledetekcja
Key words: MODIS, snow cover, hydrological model, remote sensing

Wprowadzenie

Pomiarów zmiennych meteorologicznych dokonuje się punktowo. Aby określić ich zmienność przestrzenną w przypadku opadów atmosferycznych, wykorzystuje się takie metody, jak: izolinii (interpolacja), poligonów Thiessena (wieloboki równego zadeszczenia) lub modele meteorologiczne. Metody te pozwalają otrzymać jedynie wartości teoretyczne, których zgodność z wartościami realnymi uzależniona jest od liczby punktów pomiarowych. Przyjmuje się, że jedna stacja meteorologiczna

w przypadku opadów atmosferycznych reprezentatywna jest dla obszaru 100 km². W wielu przypadkach analiz środowiskowych, takich jak modele hydrologiczne, warunek ten nie jest spełniony. Ponadto problematyczne jest określanie zmiennych zależnych od większej liczby czynników. Przykładem może być zasięg pokrywy śnieżnej, zależny nie tylko od wysokości wcześniejszych opadów, ale również od bilansu cieplnego.

W dzisiejszych czasach dla większości powierzchni Ziemi satelity, posiadające sensory rejestrujące zmienne meteorologiczne, wykonują łącznie kilka zdjęć dziennie. Zdjęcia są ogólnodostępne i posiadają rozdzielczość terenową rzędu 0,25–50 km, która nie jest możliwa do osiągnięcia w przypadku pomiarów naziemnych. Niestety w przypadku

zmiennych związanych z niskimi partiami atmosfery lub powierzchnią Ziemi należy liczyć się ze zmniejszoną częstotliwością pomiarów (rozdzielczość czasowa) ze względu na zachmurzenie, które absorbuje odbite od powierzchni Ziemi słoneczne promieniowanie elektromagnetyczne i uniemożliwia pomiar.

Sensorem charakteryzującym się dużą rozdzielczością spektralną, pozwalającą na pośredni (po przeliczeniu z wartości refleksyjności) pomiar zmiennych meteorologicznych, jest MODIS. Sensory te znajdują się na dwóch satelitach Terra oraz Aqua, co zwiększa rozdzielczość czasową zdjęć i zmniejsza problemy związane z zachmurzeniem. Ponadto posiada on stosunkowo dużą rozdzielczość przestrzenną – 250, 500 lub 1000 m, w zależności od kanału spektralnego, w którym dokonywany jest pomiar. Jest ona wystarczająca w większości zastosowań hydrologicznych wykonywanych w skali średniej i dużej zlewni. Dużą zaletą jest publikowanie danych przestrzennych nie tylko jako surowych wartości refleksyjności, ale także jako gotowych produktów przedstawiających rozkład przestrzenny wybranych zmiennych meteorologicznych, oraz informacji o stanie wegetacji i użytkowaniu przestrzennym.

W opracowaniu przedstawiona została analiza wykorzystania jednego z produktów MODIS – powierzchni terenu pokrytej śniegiem, w celu poprawienia wyników modelowania hydrologicznego.

Pierwsze próby wyznaczania obszaru pokrywy śnieżnej polegały na klasyfikacji danych teledetekcyjnych do map binarnych (Rango i Itten 1976, Martiniec i Rango 1981), następnie próbowano

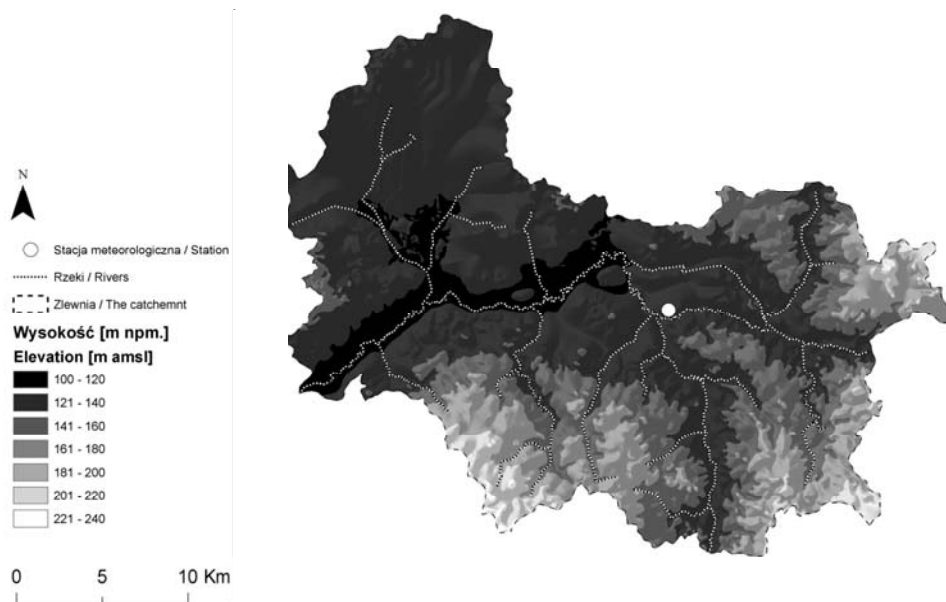
wykorzystać klasyfikację subpixel (Rosenthal i Dozier 1996, Elder i in. 1998). Aktualnie z uwagi na łatwą dostępność i wysoką częstotliwość pomiarów satelity często wykorzystuje się gotowe produkty MODIS (Tekeli i in. 2005, Jain i in. 2010). W przypadku małych zlewni górskich można zastosować zwykły aparat fotograficzny (Farinotti i in. 2010).

W dziedzinie hydrologii bardziej użyteczną zmienną niż zasięg pokrywy śnieżnej jest równoważnik wodny śniegu. Zmienna ta pozwala określić wielkość zasilania zlewni wodą roztopową, nie może być jednak bezpośrednio wyznaczana za pomocą pasywnych pomiarów teledetekcyjnych. Ciekawym sposobem ominięcia równoważnika wodnego śniegu w modelowaniu hydrologicznym jest wyznaczenie zależności zanikania śniegu na podstawie zmian wartości Normalized Difference Snow Index (NDSI) w czasie (Kolberg i Gottschalk 2010). Zależność ta bezpośrednio informuje o objętości wody roztopowej.

Material i metody

Teren badań

Terenem analizy jest zlewnia górnej Biebrzy zamknięta profilem wodowskazowym Sztabin, o powierzchni około 800 km² (rys. 1). Obszar ten analizowany był w licznych studiach, dotyczących hydrologii i modelowania hydrologicznego wód powierzchniowych (Wasilewski i Chormański 2009, Porretta-Brandyk i in. 2010, Chormański i Batelaan 2011) i podziemnych (van Loon i in. 2009). Na klimat, który można określić jako zbliżony do kontynentalnego z elementami subborealnego, mają wpływ lokalne uwarunkowania, takie jak ukształtowanie



RYSUNEK 1. Teren badań
FIGURE 1. Study area

terenu oraz obecność rozległych obszarów mokradłowych. Charakteryzuje go długa zima (od 107 do 117 dni), duża liczba dni mroźnych (dni z temperaturą maksymalną poniżej 0°C – od 57 do 66 w ciągu roku), długotrwałe zaleganie pokrywy śnieżnej, krótkie przedwiośnie i bardzo krótki okres wegetacyjny. W obniżeniach terenowych, do których napływa chłodne powietrze z wysoczyzn, mają miejsce lokalne przymrozki i pokrywa śnieżna może utrzymywać się dłużej niż na wysoczyźnie (Kossowska-Cezak 1984).

Dostępność danych

Dane przestrzenne wykorzystane w analizie to produkt MODIS/Terra MOD10A2, który zawiera pola danych maksymalnego 8-dniowego zasięgu powierzchni pokrytej śniegiem podczas dnia i nocy z uwzględnieniem chronolo-

gii gromadzenia się śniegu. Format zapisu danych to HDF-EOS (Hierarchical Data Format-Earth Observing System) oraz metadane. Pojedynczy produkt MOD10A2 zawiera siatkę danych 1200 na 1200 km w rozdzielczości 500 m, w sinusoidalnym odwzorowaniu geograficznym.

Dane meteorologiczne wykorzystane w pracy obejmowały pomiary grubości pokrywy śnieżnej w posterunku meteorologicznym SGGW zlokalizowanym w miejscowości Rogożynek, znajdującej się w centralnym punkcie zlewni górnej Biebrzy (rys. 1).

Metodyka

Algorytm przeliczania wartości refleksyjności na informację o obecności śniegu opiera się na wskaźniku *NDSI*, którego jakość jest poprawiana przez dodatkowe kryteria i testy (Hall i in. 2006).

Wskaźnik ten liczony jest za pomocą następującego wzoru:

$$NDSI = \frac{kanal_4 - kanal_6}{kanal_4 + kanal_6} \quad (1)$$

gdzie:

$NDSI$ – Normalized Difference Snow Index [–],

$kanal_4$ – wartość refleksyjności w przedziale 545–565 nm [–],

$kanal_6$ – wartość refleksyjności w przedziale 1628–1652 nm [–].

Kanały te zostały dobrane w ten sposób, ponieważ śnieg posiada dużą refleksyjność w zakresie optycznym oraz małą w zakresie krótkofalowej podczerwieni (około 1600 nm). W przypadku wartości $NDSI$ większych niż 0,4 oraz spełnienia dodatkowych kryteriów (wartości refleksyjności $kanal_2$ oraz $kanal_4$ większe niż 0,10) stwierdza się wykrycie pokrywy śnieżnej (Riggs i Hall 2004).

Do celów analizy produkt MOD10A2 przekształcono do systemu odwzorowania geograficznego UTM strefa 34N oraz przycięto do terenu analizy, otrzymując zestaw danych o wymiarach 41,5 na 34,5 km (83×69 komórek rastra).

Do celów analizy wykorzystano maksymalny 8-dniowy zasięg pokrywy śnieżnej ze względu na duży udział chmur w chronologicznych danych 1-dniowych. Z tego powodu dane meteorologiczne ze stacji Rogożynek agregowano z okresów 5-dniowych do 8-dniowych o tym samym początku okresu co dane MOD10A2. Okres analizy to 01-11-2008 do 31-03-2010.

Użyto dwóch wskaźników pokrycia śniegiem analizowanego obszaru (zlewni lub innego):

– wskaźnik pokrycia śniegiem, bezwzględny (A_b) [–]

$$A_b = \sum_{i=1}^n \frac{A_{s,i}}{A} \quad (2)$$

gdzie:

$A_{s,i}$ – liczba komórek rastra, w których dla danego obszaru stwierdzono pokrywą śnieżną w danym 8-dniowym okresie i spośród sum wszystkich okresów n [–],

A – liczba wszystkich komórek rastra dla danego obszaru [–],

– wskaźnik pokrycia śniegiem, względny (A_w) [–]

$$A_w = \sum_{i=1}^n \frac{A_{s,i}}{A - A_{c,i}} \quad (3)$$

gdzie $A_{c,i}$ – liczba komórek rastra, w których dla danego obszaru stwierdzono chmury; w tym przypadku założono, że teren zakryty przez chmury pokryty jest śniegiem w takim samym stopniu jak teren niezakryty chmurami.

Częstotliwość występowania śniegu w komórce rastra liczono następująco:

$$F = \frac{N_s}{N - N_c} \quad (4)$$

gdzie:

F – częstotliwość występowania śniegu [–],

N_s – liczba okresów 8-dniowych, w których wystąpił śnieg,

N_c – liczba okresów 8-dniowych z zachmurzeniem (brak danych),

N – liczba wszystkich okresów 8-dniowych w analizowanym okresie.

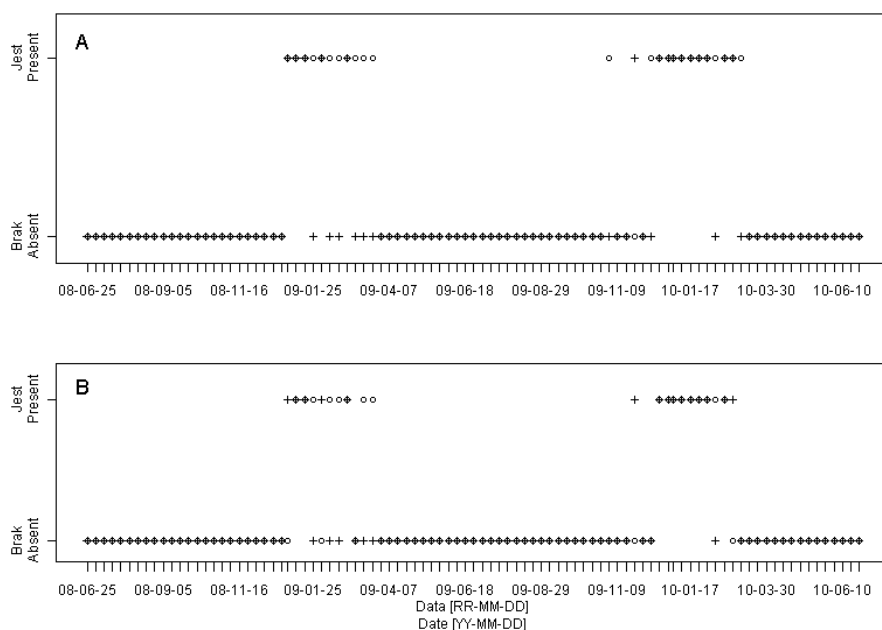
W ramach analizy geostatystycznej dopasowano modele semiwariogramów przez minimalizację średniego błędu kwadratowego. Semiwariogramy wyznaczono we wszystkich kierunkach oraz dla kierunków 0° i 90°.

Wyniki. Porównanie danych z naziemnej stacji meteorologicznej Rogożynek z danymi MOD10A2

Punktowa ocena jakości danych MOD10A2

Sprawdzono, czy w okresach, w których badano pokrywę śnieżną w stacji meteorologicznej, stwierdzono ją także

za pomocą danych pochodzących z satelity. Ponieważ grubość pokrywy śnieżnej mierzono na wysoczyźnie oraz w dolinie rzeki Biebrzy, porównanie wykonano dla obu wartości (rys. 2). Wartości rzeczywiste odczytu grubości śniegu w stacji meteorologicznej zmieniono na wartości kategorię: „jest” – grubość śniegu > 0 cm, „brak” – grubość śniegu = 0 cm. Zmienne cechuje korelacja 0,68 (dolina) oraz 0,62 (wysoczyzna). Należy wziąć pod uwagę, że porównano powierzchnię jednej komórki rastra (25 ha) z pomiarem punktowym, co oznacza, że jakość danych MOD10A2 jest wysoka. Jednocześnie można zauważyć na rysunku 2, że zima z okresu 2009/2010 jest obar-



RYSUNEK 2. Porównanie obecności pokrywy śnieżnej na podstawie danych ze stacji meteorologicznej Rogożynek w dolinie (A) oraz na wysoczyźnie (B) z danymi komórki rastra MOD10A2 dla terenu stacji: ○ dane ze stacji meteorologicznej, + dane MOD10A2

FIGURE 2. Comparison of a snow cover presence in the land surface station Rogożynek in the valley (A) and on the upland (B), with the MOD10A2 data raster cell containing the station: ○ land surface station data, + MOD10A2 data

czona mniejszym błędem niż z okresem 2008/2009, co wynika z większego zachmurzenia w drugim okresie.

Porównanie punktowych danych meteorologicznych z danymi dla całej zlewni

Przyjęto, że stwierdza się obecność śniegu w zlewni, jeżeli wskaźnik pokrycia śniegiem jest większy niż 10%, czyli większy niż maksymalny błąd danych MOD10A2 dla użytkowania terenu z udziałem rolnictwa i lasów (Hall i in. 2006). Dane ze stacji meteorologicznej przekształcono na wartości katégoryczne, a dane MOD10A2, według zasady: „jest” – udział śniegu > 10%, „brak” – udział śniegu < 10%.

Różnice między wartością współczynnika korelacji dla A_b i A_w (tab. 1) zwracają uwagę na problem zachmurzenia, który jest eliminowany w przypadku A_w . Wartości korelacji dla A_w były większe niż wartości korelacji obliczone w punkcie stacji meteorologicznej, co sugeruje, że im większy jest analizowany obszar, tym negatywny wpływ chmur na wyniki pomiarów jest mniejszy.

Porównanie zmian grubości pokrywy śnieżnej w stacji meteorologicznej ze zmianami zasięgu pokrywy śnieżnej w zlewni

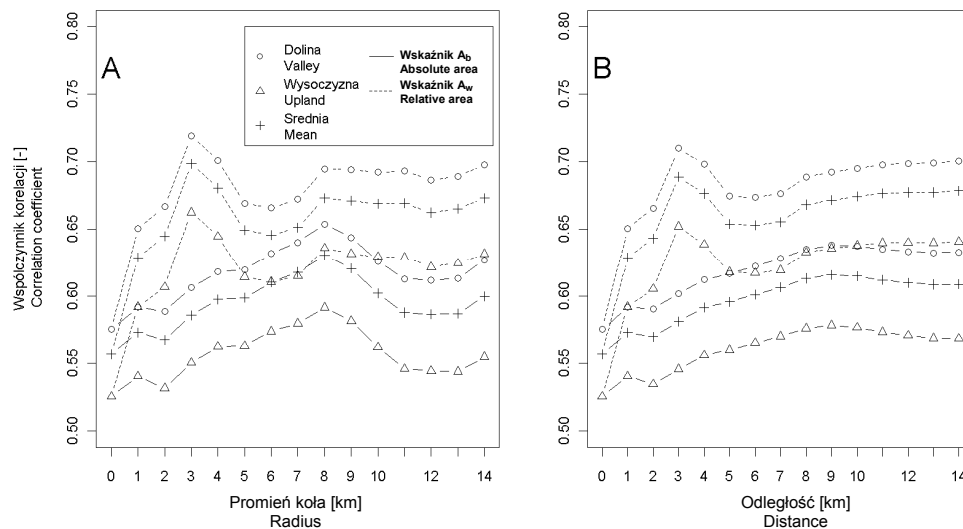
Kolejnym etapem było sprawdzenie, czy zmiany grubości pokrywy śnieżnej posiadają związek liniowy ze zmianą zasięgu pokrywy śnieżnej dla następujących obszarów: 14 pierścieni o szerokości 1 km oddalonych od stacji meteorologicznej od 1 do 14 km; 14 kół o promieniach od 1 do 14 km o środku w miejscu stacji meteorologicznej; punkt stacji meteorologicznej; zlewnia.

Jak przedstawiono na rysunku 3A, korelacja grubości pokrywy śnieżnej z wartościami udziału tej pokrywy w powierzchni terenu wzrasta wraz ze zwiększaniem się powierzchni analizowanego terenu, a następnie jej wartość stabilizuje się dla powierzchni o promieniach większych niż 9 km. Oznacza to, że grubość pokrywy śnieżnej ma związek ze wskaźnikiem pokrycia śniegiem tylko dla obszarów o odpowiednich rozmiarach, posiadających wystarczającą różnorodność pokrywy śnieżnej (rys. 3). Analiza geostatystyczna wskazuje największe odległości (granice), dla których

TABELA 1. Korelacja występowania pokrywy śnieżnej w stacji meteorologicznej Rogożynek z danymi MOD10A2 dla całej zlewni Biebrzy górnej

TABLE 1. Correlation coefficients between presence of snow cover in the land surface station Rogożynek with MOD10A2 for an entire catchment. Relative area – area of clouds was subtracted from the catchment area; absolute area – catchment area was constant

Występowanie pokrywy śnieżnej w stacji meteorologicznej Presence of snow cover at the land surface station	Występowanie pokrywy śnieżnej w zlewni Presence of snow cover	
	wskaźnik pokrycia śniegiem względny (A_w) relative area	wskaźnik pokrycia śniegiem bezwzględny (A_b) absolute area
Wysoczyzna / Upland	0,66	0,58
Dolina / Valley	0,73	0,66



RYSUNEK 3. Korelacja grubości pokrywy śnieżnej w stacji meteorologicznej Rogożynek: A – ze wskaźnikiem pokrywy śnieżnej w powierzchni kół o danym promieniu, o środku w punkcie stacji meteorologicznej, B – ze wskaźnikiem pokrywy śnieżnej w powierzchni pierścieni szerokości 1 km, o środku w punkcie stacji meteorologicznej, oddalonych od niej o daną odległość (promień / odległość 0 km – punkt stacji meteorologicznej)

FIGURE 3. Correlation between depth of snow pack in the land surface station Rogożynek and: A – percentage of snow cover in disks with a center at the station and a given radius, B – percentage of snow cover in 1 km width rings with a center at the station for a given distance apart (radius / distance 0 km indicates the point of the land surface station)

pomiary punktowe głębokości śniegu mają związek ze wskaźnikiem pokrycia śniegiem. Sytuacja jest podobna w przypadku analizy przedstawionej na rysunku 3B. Wynika z niej, że współczynnik korelacji wzrasta wraz ze zwiększaniem się odległości analizowanego obszaru (pierścienia) od stacji meteorologicznej do pewnego momentu w którym współczynnik korelacji osiąga maksimum, a następnie jego wartość zmniejsza się. Dla A_w odległość ta jest mniejsza niż w przypadku A_b . Po raz kolejny zwraca to uwagę na problem zachmurzenia.

Korelacja grubości pokrywy śnieżnej w stacji metrologicznej z wartościami udziału tej pokrywy w powierzchni całej zlewni przedstawiona została w tabeli 2.

Podobnie jak w poprzednich przypadkach zaobserwowano większy związek między zmiennymi w przypadku użycia A_w . Ponadto ponownie najwyższą korelacją charakteryzowały się dane pomiarowe dla doliny.

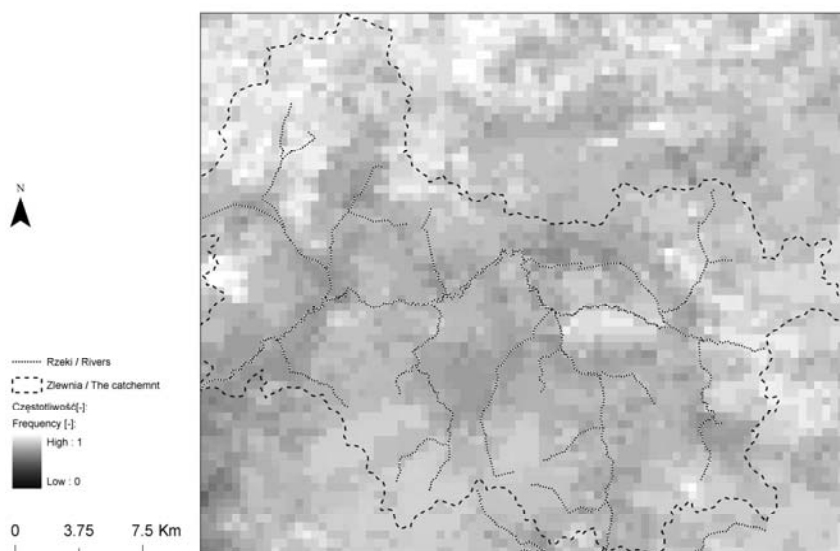
Analiza geostatystyczna występowania pokrywy śnieżnej

Wyznaczono mapę częstotliwości występowania pokrywy śnieżnej w komórkach rastra (F , rys. 4) w dwóch okresach jej występowania w zlewni: od 10 grudnia 2008 roku do 14 marca 2009 roku oraz od 9 listopada 2009 roku do 14 marca 2010 roku. Dla mapy F wyznaczono wariogramy empiryczne oraz teoretyczne (rys. 5), których parametry

TABELA 2. Korelacja grubości pokrywy śnieżnej ze stacji meteorologicznej Rogożynek ze wskaźnikami pokrycia śniegiem dla zlewni Biebrzy górnej wyznaczonej na podstawie danych MOD10A2.

TABLE 2. Correlation coefficients between a snow pack depth in the land surface station Rogożynek and a percentage of snow cover in the catchment estimated with the MOD10A2 data. Relative area – area of clouds was subtracted from the catchment area; absolute area – catchment area was constant

Grubość pokrywy śnieżnej w stacji meteorologicznej Snow pack depth at the land surface station	Wskaźnik pokrycia śniegiem Percentage of snow cover in the catchment	
	względny (A_w) relative area	bezwzględny (A_b) absolute area
Wysoczyzna / Upland	0,63	0,56
Dolina / Valley	0,70	0,63
Średnia / Mean	0,67	0,60

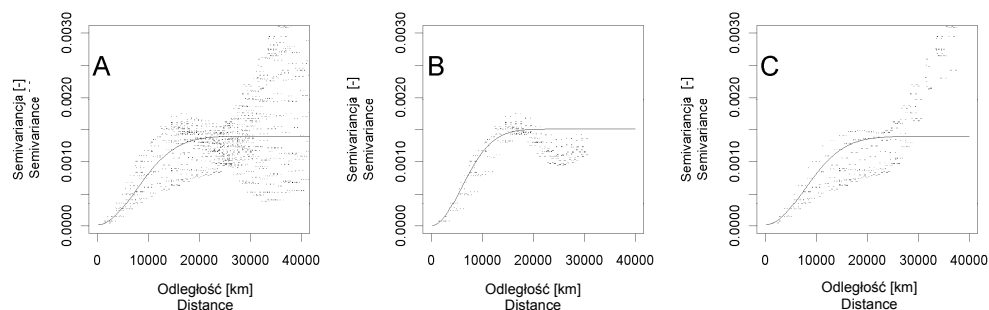


RYSUNEK 4. Częstotliwość występowania pokrywy śnieżnej (F) w terenie badań w okresach od 10-12-2008 do 14-03-2009 oraz od 09-11-2009 do 14-03-2010

FIGURE 4. Frequency of snow cover occurrence in the study area in the periods from 10-12-2008 to 14-03-2009 and from 09-11-2009 to 14-03-2010

przedstawione są w tabeli 3. Z analizy wariogramów teoretycznych wynika, że występowanie pokrywy śnieżnej jest przestrzennie zależne na odległość około 14–19 km. Oznacza to, że wartości korelacji przedstawione na rysunku 3 zmniejszałyby się dla odległości lub promieni większych niż 14 km. Efekt ten nie może

zostać przedstawiony w niniejszym artykule, ze względu na usytuowanie stacji meteorologicznej, która znajduje się nie dalej niż 14 km od granicy terenu badań. Różnica między zakresami oddziaływania semiwariogramów liczonych dla różnych kierunków (tab. 3) świadczy o różnicy w przestrzennym rozłożeniu śniegu



RYSUNEK 5. Semiwariogramy empiryczne (punkty) oraz teoretyczne (linie) dla mapy częstości występowania pokrywy śnieżnej: A – we wszystkich kierunkach, B – w kierunku 0°, C – w kierunku 90°
 FIGURE 5. Empirical (points) and theoretical (lines) semivariograms for the map of snow cover occurrence frequency. A – all directions, B – 0° direction, C – 90° direction

TABELA 3. Parametry semiwariogramów teoretycznych wyznaczonych dla mapy częstości występowania pokrywy śnieżnej

TABLE 3. Parameters of the theoretical semivariograms calculated for the map of snow cover frequency

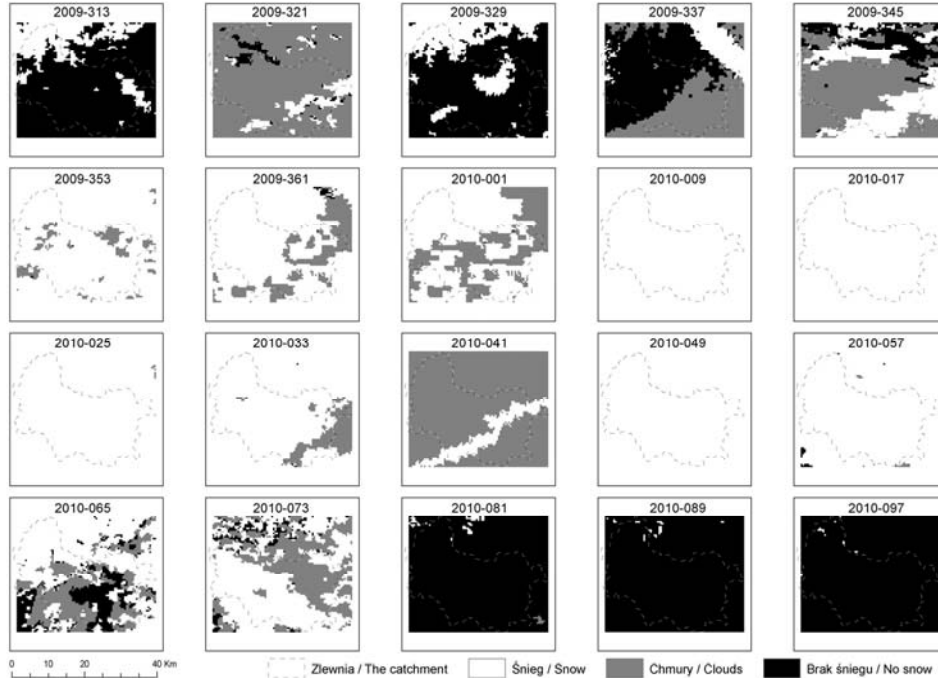
Wyszczególnienie Specification	Kierunek / Direction		
	wszystkie / all	0°	90°
Zasięg oddziaływania Range [m]	18 640,7	14 500	18 597,8
Wartość progowa / Sill [-]	0,001381	0,001501	0,001377
Samorodek / Nugget [-]	$1,28 \times 10^{-05}$	$1,5 \times 10^{-06}$	$1,29 \times 10^{-05}$
Model / Model	Gausa / Gaussian	Gausa / Gaussian	Gausa / Gaussian
Średni błąd kwadratowy RMSE [-]	0,001419	0,001073	0,00015

w zależności od miejsca występowania. Efekt ten widoczny jest także na rysunku 4, gdzie przestrzenne rozłożenie F wskazuje na dłuższy okres występowania śniegu na wysoczyźnie (szczególnie w północnej, zalesionej części) niż w dolinie.

Analiza możliwości wykorzystania danych MOD10A2 w modelowaniu hydrologicznym

Nierównomierność zasięgu pokrywy śnieżnej w zlewni górnej Biebrzy,

określoną jako zmienną w 8-dniowych interwałach czasowych w okresie od 9 listopada 2009 roku (2009-313) do 7 kwietnia 2010 roku (2010-097), przedstawiono na rysunku 6. Pomimo wyraźnych braków danych w okresie, gdy zlewnię pokrywają chmury, widać, że w okresie poprzedzającym roztopy pokrywa śnieżna występowała jedynie na fragmencie zlewni. Dane te mogą posłużyć pośrednio do przestrzennego wagowego określania wielkości roztopów lub opadów śniegu wyznaczonych w zlewniach różnicowych metodą stopień-dzień.



RYSUNEK 6. Zmienność zasięgu pokrywy śnieżnej dla zlewni górnej Biebrzy w okresie od 2009-11-09 (2009-313) do 2010-04-07 (2010-097). Okresy 8-dniowe opisano za pomocą daty rozpoczęcia okresu w formie rok-dzień roku

FIGURE 6. The variability of snow cover extent in the upper Biebrza catchment in the period 2009-11-09 (2009-313) to 2010-04-07 (2010-097). The 8-day periods were labeled with a date indicating the beginning of the period; in form: Year-Day

Metoda stopień-dzień jest wykorzystywana w modelu hydrologicznym WetSpa (Liu i in. 2002). Informację o zróżnicowaniu porywy śnieżnej można wykorzystać do obliczenia objętości zasilania z roztopów $M(t)$ w zlewni różnicowej. W tym celu można wykorzystać zależność przedstawioną przez Liston (1998):

$$M(t) = A_{zr} M_q(t) S(t) dt \quad (5)$$

gdzie:

$M(t)$ – objętość zasilania roztopów [m^3],

$M_q(t)$ – stopa roztopów [$m \cdot h^{-1}$] w czasie t [h] (wartość $M_q(t)$ można oszacować za pomocą metody stopień-dzień),

A_{zr} – powierzchnia zlewni różnicowej [m^2],

$S(t)$ – wskaźnik pokrycia zlewni śniegiem [-] (wartość A_b lub A_w obliczona dla czasu t).

Ta prosta metoda pozwoli różnicować roztopy śniegu na powierzchni zlewni zgodnie z rzeczywistymi zmianami zasięgu pokrywy śnieżnej wyznaczonej na podstawie zdjęć satelitarnych. Pozwoli to uzyskać dokładniejszą prognozę

odpływu niż wykorzystanie technik interpolacji (np. metoda Thiessena) obszaru pokrywy śnieżnej. Podobna metoda, z wykorzystaniem danych MODIS oraz danych SAR, została użyta do zmiany koncepcji modelu SWAT przez Nagler i innych (2008), dając dobre rezultaty.

Wnioski

Przeprowadzona analiza wykazała, że dane MOD10A2 mają dużą punktową dokładność w ujęciu jakościowym (obecność lub brak pokrywy śnieżnej). Ponadto stwierdzono, że zmiany wskaźnika pokrycia śniegiem mają silny liniowy związek z grubością pokrycia śniegu w stacji meteorologicznej Rogożynek. Największy związek stwierdzono dla wyników pomiarów wykonywanych w dolinie.

Analiza nie wykazała, że pojedyncza stacja meteorologiczna daje reprezentatywne pomiary grubości śniegu, mimo tego że korelacja wskaźnika pokrycia śniegiem z grubością śniegu w stacji meteorologicznej uzyskała duże wartości. Wartości te jedynie potwierdzają liniowy związek między tymi zmiennymi i są potwierdzeniem jakości danych MOD10A2. Ponadto analiza geostatystyczna wskazała maksymalne odległości, dla których występowanie pokrywy śnieżnej w terenie badań jest przestrzennie zależne.

Należy pamiętać, że dane satelitarne, mimo coraz większej dostępności i wzrastających możliwości wykorzystania, nie zastąpią danych z pomiarów naziemnych. Są bowiem obciążone błędami przetwarzania, wynikającymi z wielu źródeł – między innymi z zachmurzenia. Mimo tego pozwalają poszerzyć naszą

wiedzę i zebrać dodatkowe informacje o zmienności m.in. zjawisk meteorologicznych.

Ponadto przedstawiono prosty sposób wprowadzenia informacji o zróżnicowaniu obszaru pokrywy śnieżnej do modelu hydrologicznego wykorzystującego do szacowania roztopów model stopień-dzień. Ta część analizy jest rozwojowa i wymaga dalszych badań.

Literatura

- CHORMAŃSKI J., BATELAAN O. 2011: Application of the WetSpa distributed hydrological model for catchment with significant contribution of organic soil. Upper Biebrza case study. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation* (w druku).
- ELDER K., ROSENTHAL W., DAVIS R.E. 1998: Estimating the spatial distribution of snow water equivalence in a montane watershed. *Hydrol. Process.* 12: 1793–1808.
- FARINOTTI D., MAGNUSSON J., HUSS M., BAUDER A. 2010: Snow accumulation distribution inferred from time-lapse photography and simple modelling. *Hydrol. Process.* 24: 2087–2097.
- HALL D.K., RIGGS G.A., SALOMONSON V.V. 2006: Updated weekly. MODIS/Terra Snow Cover 8-day L3 Global 500m Grid V005. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. Digital media.
- JAIN S.K., GOSWAMI A., SARAF A.K. 2010: Snowmelt runoff modelling in a Himalayan basin with the aid of satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 31: 6603–6618.
- KOLBERG S., GOTTSCHALK L. 2010: Interannual stability of grid cell snow depletion curves as estimated from MODIS images. *Water Resour. Res.* 46: 1–15.
- KOSSOWSKA-CEZAK U. 1984: Climate of the Biebrza ice-margin Halley. *Polish Ecol. Stud.* 10 (3–4): 253–270.
- LISTON G.E. 1999: Interrelationships among Snow Distribution, Snowmelt, and Snow Cover Depletion: Implications for Atmo-

- spheric, Hydrologic, and Ecologic Modeling. *J. Appl. Meteor.* 38: 1474–1487.
- LIU Y.B., De SMEDT F., PFISTER L. 2002: Flood prediction with the WetSpa model on catchment scale. In: Flood Defense '2002. Science Press, New York: 499–507.
- MARTINEC J., RANGO A. 1981: Areal Distribution of Snow Water Equivalent Evaluated by Snow Cover Monitoring. *Water Resour. Res.* 17: 1480–1488.
- NAGLER T., ROTT H., MALCHER P., MÜLLER F. 2008: Assimilation of meteorological and remote sensing data for snowmelt runoff forecasting. *Remote Sensing of Environment* 112: 1408–1420.
- PORRETTA-BRANDYK L., CHORMAŃSKI J., IGNAR S., OKRUSZKO T., BRANDYK A., SZYMCAK T., KRĘŻAŁEK K. 2010: Estimation of distributed hydrological model quality for different types of rural catchments. *J. Water and Land Development* 14: 115–133.
- RANGO A., ITTEN K.I. 1976: Satellite Potentials in Snowcover Monitoring and Runoff Prediction. *Nordic Hydrology* 7: 209–230.
- RIGGS G., HALL D.K. 2004: Snow Mapping with the MODIS Aqua Instrument. Proceedings of the 61st Eastern Snow Conference. Portland, Maine, USA.
- ROSENTHAL W., DOZIER J. 1996: Automated Mapping of Montane Snow Cover at Sub-pixel Resolution from the Landsat Thematic Mapper. *Water Resour. Res.* 32: 115–130.
- TEKELI A.E., AKYÜREK Z., ARDA SORMAN A., SENSOY A., ÜNAL SORMAN A. 2005: Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey. *Remote Sensing of Environment* 97: 216–230.
- van LOON A.H., SCHOT P.P., GRIFFIOEN J., BIERKENS M.F.P., BATELAAN O., WASEN M.J. 2009: Throughflow as a determining factor for habitat contiguity in a near-natural fen. *J. Hydrol.* 379: 30–40.
- WASILEWSKI M., CHORMAŃSKI J. 2009: The Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model as an alternative data source for deriving hydrological characteristics in lowland catchment. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation* 41: 71–82.

Summary

Analysis of use of satellite imagery for extraction of snow cover distribution as a parameter in a rainfall-runoff model.

Interpolation of point measurements of meteorological variables in relatively big areas (eg. medium and big catchments) does not reflect their real distribution. The study area is the upper Biebrza River catchment, meteorological data were recorded in a Rogoźnynek station. This paper analyses possibilities of usage of a satellite data (MOD10A2, a spatial distribution of a snow cover) as a parameter in a hydrological model, which uses a day-degree method for a snowmelt estimation. The analysis shown a high correlation (0.68) between presence of a snow cover in a land surface station and in satellite data. Moreover, a strong linear relationship (correlation of 0.70) was found between a snow pack depth in the land surface station and an area of snow cover in the catchment estimated from satellite data. Geostatistical analysis of snow cover frequency in a pixel was made. A method of use a MOD10A2 data in a hydrological model was proposed.

Author's address:

Tomasz Berezowski
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
 Katedra Inżynierii Wodnej
 ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
 Poland
 e-mail: t.berezowski@levis.sggw.pl