

Izabela Jankowska

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa
e-mail: izabela.jankowska@imgw.pl

**MODEL STRUKTURY PRZESTRZENNEJ ZASOBÓW WODNYCH
STREFY AERACJI W ZLEWNI NIZINNEJ**

**Model of the spatial structure of the soil water storage in the lowland
catchment**

Słowa kluczowe: uwilgotnienie gleby, zasoby wodne strefy aeracji, zlewnia Liwca, wskaźnik TWI, analizy GIS

Key words: soil moisture, soil water storage, Liwiec catchment, topographic wetness index, GIS analysis

WSTĘP

Wiedza o dynamice zasobów wodnych strefy aeracji jest kluczowa w wielu zagadnieniach badawczych, mających charakter zarówno badań podstawowych, jak i aplikacyjnych. Jest ona istotna w prognozowaniu przepływu rzek (Scipal i in. 2005), przyczynia się do poprawy skuteczności regionalnych i globalnych modeli klimatu, jak również wpływa na jakość prognozowania pogody w mezoskali (Schär i in. 1999). Zmiany zasobów wodnych strefy aeracji mogą również stanowić wskaźnik zachodzących zmian klimatu ze względu na dużą wrażliwość tego parametru na fluktuacje elementów meteorologicznych (Seneviratne i in. 2010). W ostatnich latach obserwuje się zmniejszanie zapasów wilgoci glebowej oraz wzrost zagrożenia suszą glebową (Jasper i in. 2006, Somorowska 2009). Wymienione kwestie świadczą o dużym znaczeniu poznawczym i praktycznym badań zasobów wodnych strefy aeracji, co sprawia, że stanowią one ważny kierunek badań hydrologicznych prowadzonych w różnych skalach przestrzennych.

Rozpoznanie zróżnicowania przestrzennego zasobów wodnych gleby jest bardzo trudne, ze względu na dużą rozpiętość skali przestrzennej takich badań. Z jednej strony wykonuje się precyzyjne badania punktowe, które wymagają dużych nakładów pracy, natomiast z drugiej – badania satelitarne prowadzone w skalach regionalnej i globalnej, które dostarczają informacji o uwilgotnieniu obszarowym. Brakuje natomiast rozpoznania tego zagadnienia w skalach pośrednich, przede wszystkim w skali zlewni, która jest podstawową jednostką w badaniach hydro-

logicznych. Objęcie badaniami terenowymi nawet niewielkich zlewni jest bardzo trudne. Z kolei rozdzielczość i dokładność danych satelitarnych nie zawsze sprzyjają badaniom małych obszarów. Szczegółowe rozpoznanie procesów związanych z dynamiką wód strefy aeracji wymaga prowadzenia badań w różnych skalach przestrzennych oraz wprowadzenia metod umożliwiających łączenie różnych skal. Zagadnienie przestrzennych skal badawczych oraz problematyka skalowania, czyli przechodzenia od jednej skali badawczej do drugiej, nie są nowe w hydrologii i wielokrotnie powracały jako zadania priorytetowe (Blöschl 2001, Gutry-Korycka 2001, Vinogradov i in. 2011). Najistotniejsze jest tu połączenie precyzji terenowych badań punktowych i możliwości obszarowej oceny warunków wilgotnościowych. Łączenie badań hydrologicznych przeprowadzonych w punkcie i w skali zlewni pozostaje nadal otwartym zadaniem badawczym (Somorowska 2006).

Możliwość przejścia od informacji punktowej do informacji przestrzennej stwarza koncepcja stabilności czasowej wprowadzona w pedohydrologii przez G. Vachauda i in. (1985). Zgodnie z tą koncepcją istnieją w danej przestrzeni punkty, które wykazują dynamikę czasową wilgotności gleby zbliżoną do dynamiki średniego uwilgotnienia w całej przestrzeni. Koncepcja stabilności czasowej uwilgotnienia gleby była przedmiotem licznych prac badawczych prowadzonych w różnych skalach przestrzennych i czasowych (Starks i in. 2006; Somorowska, Piętka 2010; Zhao i in. 2010). Znalazła ona również zastosowanie w zlewniach o dużej heterogeniczności pokrywy glebowej (Martínez-Fernández, Ceballos 2003).

Zasoby wodne strefy aeracji wykazują duże zróżnicowanie przestrzenne, zarówno w układzie poziomym, jak i pionowym (Teuling, Troch 2005). Do najczęściej wymienianych czynników decydujących o tym zróżnicowaniu w skali zlewni należą: uziarnienie, ukształtowanie powierzchni terenu, głębokość do zwierciadła wody podziemnej, warunki klimatyczne oraz rodzaj i gęstość roślinności. Dominującą rolę w hierarchii tych czynników odgrywa, według wielu autorów, ukształtowanie powierzchni (Vachaud i in. 1985, Crave, Gascuel-Odoux 1997). Topografia terenu steruje bowiem sływem powierzchniowym i podpowierzchniowym wody oraz wpływa na procesy jej retencji. R. B. Grayson i in. (1997) stwierdzili, że w okresach, kiedy ewapotranspiracja przewyższa opad, struktura uwilgotnienia odzwierciedla zróżnicowanie roślinności i uziarnienia gleby. W przypadku, gdy opad przewyższa ewapotranspirację, topografia jest dominującym czynnikiem, wpływającym na zróżnicowanie przestrzenne wilgotności gleby. Hipoteza o znaczącej roli topografii w kształtowaniu zróżnicowania przestrzennego uwilgotnienia gleby stanowiła podstawę opracowania topograficznego wskaźnika wilgotności TWI (ang. *Topographic Wetness Index*) (Beven, Kirkby 1979). Jest on szeroko stosowany w literaturze do oceny zróżnicowania przestrzennego warunków wilgotnościowych (m.in. Grabs i in. 2009, Temimi i in. 2010).

W pracy podjęto zagadnienie przestrzennego zróżnicowania uwilgotnienia gleby w zlewni nizinnej¹. Jako obszar badań wybrano zlewnię Liwca, lewego dopływu Bugu o powierzchni 2759,5 km² wg Mapy Podziału Hydrograficznego Polski

¹ W pracy wykorzystano materiały pochodzące z pracy doktorskiej autorki (Piętka I. 2013).

w skali 1: 50 000 (Czarnecka i in. 2006). Celem badań jest rozpoznanie zróżnicowania przestrzennego uwilgotnienia gleby w zlewni na podstawie statycznego modelu struktury przestrzennej warunków wilgotnościowych. Zaproponowano też procedurę połączenia przestrzennych skal badawczych – punktu i zlewni. Wykorzystano wyniki punktowych pomiarów terenowych wilgotności gleby oraz metodykę parametryzacji czynników kształtujących stan retencji strefy aeracji. Praca ma charakter metodyczny i poznawczy.

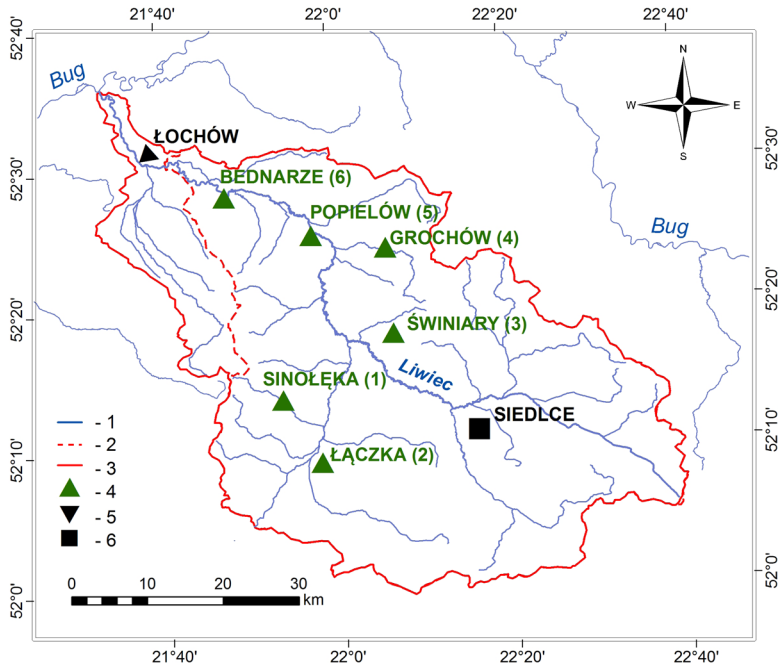
MATERIAL BADAWCZY

W pracy wykorzystano wyniki własnych pomiarów wilgotności objętościowej gleby, prowadzonych w latach 2009-2011 w sześciu profilach badawczych w zlewni Liwca (ryc. 1). Pomiarów wykonywano automatycznie przenośnym miernikiem FOM/mts (ang. *Field Operated Meter / soil moisture, temperature, salinity*), opracowanym i wyprodukowanym w Instytucie Agrofizyki Polskiej Akademii Nauk w Lublinie pod marką East Test (Skierucha, Malicki 2004, Skierucha, Wilczek 2007). Urządzenie to działa w oparciu o metodę reflektometrii czasowej TDR, w której wykorzystuje się zależność prędkości propagacji impulsu elektromagnetycznego od przenikalności dielektrycznej badanego osadu.

Pomiary wilgotności objętościowej w profilach glebowych wykonywano na głębokościach 5 cm i 10 cm, a następnie co 10 cm. Głębokość profili Sinołęka i Grochów wynosiła 120 cm, profilu Świniary – 70 cm, a głębokość profili Łączka, Popielów i Bednarze była uzależniona od głębokości występowania zwierciadła wody podziemnej. Profile pomiarowe były każdorazowo zasypywane, a podczas kolejnej sesji pomiarowej ponownie odkopywane. Za każdym razem odkrywka była „wydłużana” od strony badanego profilu glebowego w celu odświeżenia ściany odkrywki.

Wybór profili badawczych uwarunkowany był składem granulometrycznym gleb, głębokością do wody podziemnej, położeniem topograficznym oraz dostępnością miejsc pomiarowych. W poszczególnych profilach występują utwory mineralne reprezentatywne pod względem uziarnienia dla całej zlewni. W trzech profilach glebowych – Łączka, Popielów i Bednarze, położonych w płaskodennych dolinach rzecznych obserwowano duże wahania zwierciadła wody podziemnej. Pozostałe profile – Sinołęka, Świniary i Grochów, położone są na obszarach wysoczyzn, na krótkich stokach o nachyleniu nieprzekraczającym 2°. Zwierciadło wody podziemnej na tych obszarach znajdowało się poniżej profili glebowych.

Łącznie dla profili glebowych wykonano 18 serii pomiarowych w trzech okresach badawczych od września 2009 r. do października 2011 r. W 2009 r. przeprowadzono 4 serie pomiarowe, natomiast w 2010 r. i 2011 r. przeprowadzono po 7 serii pomiarowych od kwietnia do października. Pomiarów wykonywano raz w miesiącu. Dodatkowo w lipcu 2010 r., kiedy zaobserwowano niskie uwilgotnienie gleby, pobrano dziewiętnaście próbek gleby do laboratoryjnego oznaczenia składu granul-



Ryc. 1. Rozmieszczenie profili pomiarowych wilgotności gleby na tle podstawowej struktury hydrograficznej zlewni Liwca: 1 – ciek, 2 – dział wodny zlewni Liwca, 3 – dział wodny zlewni Liwca do profilu w Łochowie, 4 – profile glebowe, 5 – stacja wodowskazowa, 6 – stacja meteorologiczna

Źródło: opracowano na podstawie Mapy Podziału Hydrograficznego Polski* w skali 1: 50 000 (Czarnecka i in. 2006)

Fig. 1. Location of the experimental soil profiles against the hydrographic network of the Liwiec catchments: 1 – river, 2 – watershed of Liwiec catchment, 3 – watershed of Liwiec catchment to a gauging profile in Łochów, 4 – soil profiles, 5 – water gauge, 6 – meteorological station

Explanations: 1 – river, 2 – watershed of Liwiec catchment, 3 – watershed of Liwiec catchment to a gauging profile in Łochów, 4 – soil profiles, 5 – water gauge, 6 – meteorological station

Source: on the basis of MPHP at a scale of 1: 50 000 (Czarnecka et al. 2006)

* Mapa Podziału Hydrograficznego Polski (MPHP) została wykonana w Ośrodku Zasobów Wodnych IMGW na zamówienie Ministra Środowiska i sfinansowana ze środków NFOŚiGW.

metrycznego według średnicy ziaren. Do wydzielenia frakcji mniejszej niż 0,1 mm zastosowano metodę areometryczną Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego (Ryżak i in. 2009). Frakcję większą niż 0,1 mm rozdzielono metodą sitową. Podziału utworów glebowych na podfrakcje i podgrupy granulometryczne dokonano według starej klasyfikacji Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego, obowiązującej do 2008 r. (PTG, 1956). Była ona stosowana w przedostatnim wydaniu Systematyki Gleb Polski (PTG, 1989) i nawiązują do niej starsze materiały kartograficz-

ne wykorzystywane w analizie (m.in. mapa glebowo-rolnicza). W 2008 r. Polskie Towarzystwo Gleboznawcze przyjęło nowy podział (PTG, 2009), zastosowany w najnowszej, piątej już Systematyce Gleb Polski (PTG, 2011). Jednak ze względu na duże różnice pomiędzy klasyfikacjami nie jest możliwe przełożenie ze starej klasyfikacji na nową wykorzystywanych materiałów kartograficznych bez znajomości danych źródłowych.

W pracy wykorzystano ponadto dane przestrzenne, które obejmowały: numeryczny model terenu, mapę glebowo-rolniczą, leśną mapę numeryczną oraz dane satelitarne wskaźnika LAI. Numeryczny model terenu SRTM (ang. *Shuttle Radar Topography Mission*) w wersji 4 pozyskano z bazy danych CGIAR-CSI (ang. *Consortium for Spatial Information of the Consultative Group for International Agricultural Research*) (Jarvis i in. 2008). Model wykonany jest w rozdzielczości przestrzennej 3", co odpowiada około 90 m na równiku. W pracy wykorzystano również mapę glebowo-rolniczą w wersji cyfrowej w skali 1: 25 000. Zawiera ona informacje dla obszarów użytkowanych rolniczo oraz lasów prywatnych. Informacje o uziarnieniu gleb na obszarze lasów państwowych zostały uzupełnione z leśnej mapy numerycznej (LMN), która stanowi bazę danych przestrzennych o lasach w Polsce. Dane wskaźnika LAI, opracowane na podstawie obrazów satelitarnych ze spektrometri MODIS (ang. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), pobrano ze strony internetowej centrum przetwarzania, gromadzenia i dystrybucji danych LP DAAC (ang. *Land Processes Distributed Active Archive Center*) (Myneni i in. 2003). Mapy wskaźnika LAI są zawarte w zestawie danych MOD15A2. Wskaźnik wyrażony jest w m² roślinności na m² powierzchni gruntu. Rozdzielczość przestrzenna danych wynosi 1000 m.

Zebrane dane przestrzenne przetwarzano i analizowano z wykorzystaniem oprogramowania ArcGIS w wersji 10. Analizy prowadzono w układzie współrzędnych 1992 w domenie przestrzennej obejmującej zlewnię Liwca i obszary sąsiadujące. Rozdzielczość wynikowa map wynosiła 150 x 150 m.

PODSTAWY TEORETYCZNE OPRACOWANIA MODELU STRUKTURY PRZESTRZENNEJ UWILGOTNIENIA GLEBY

W pracy zastosowano koncepcję stabilności czasowej uwilgotnienia gleby zaproponowaną przez G. Vachauda i in. (1985). Zakłada ona istnienie zależności między wilgotnością gleby w punkcie a wartością średnią reprezentującą cały badany obszar. Podstawą jest założenie, że główne czynniki kontrolujące zróżnicowanie przestrzenne uwilgotnienia gleby mają charakter statyczny. Zgodnie z nim, istnieje duże prawdopodobieństwo, że jeżeli dany punkt wykazuje najwyższe uwilgotnienie w danym terminie pomiarowym, to będzie on również najbardziej wilgotny w innym terminie, ponieważ decydują o tym możliwości gromadzenia wody. Zatem czasowa stabilność wilgotności gleby może być rozumiana jako czasowa niezmiennosc pewnej struktury przestrzennego jej zróżnicowania.

Stabilność czasowa uwilgotnienie gleby w zlewni Liwca została oceniona na podstawie danych eksperymentalnych. Analizę przeprowadzono dla warstwy 0-50 cm. Średnia wilgotność objętościowa w warstwie 0-50 cm została obliczona na podstawie pomiarów wilgotności objętościowej na różnych głębokościach zgodnie z równaniem (1). Współczynniki liczbowe zastosowane w równaniu wynikają z miąższości warstw, dla których reprezentatywny był pomiar wilgotności na danej głębokości.

$$\theta_{0-50cm} = 0,15\theta_5 + 0,15\theta_{10} + 0,2\theta_{20} + 0,2\theta_{30} + 0,2\theta_{40} + 0,1\theta_{50} \quad (1)$$

gdzie: θ_{0-50cm} – średnia wilgotność objętościowa w warstwie 0-50 cm [%],
 $\theta_5, \theta_{10}, \theta_{20}, \theta_{30}, \theta_{40}, \theta_{50}$ – wilgotność objętościowa zmierzona na głębokościach 5, 10, 20, 30, 40 oraz 50 cm [%].

Ocenę stabilności czasowej wykonano obliczając średnią oraz odchylenie standardowe wilgotności względnej. Wilgotność względna jest definiowana przez G. Vachaud i in. (1985) jako różnica między wilgotnością gleby w punkcie a wilgotnością obszarową, odniesioną do wilgotności obszarowej, co można wyrazić wzorem:

$$\delta_{i,t} = \frac{\theta_{i,t} - \bar{\theta}_t}{\bar{\theta}_t} \quad (2)$$

gdzie: $\theta_{i,t}$ – wilgotność objętościowa w profilu pomiarowym i w terminie pomiarowym t w warstwie 0-50 cm [%],
 $\bar{\theta}_t$ – średnia wilgotność obszarowa w terminie pomiarowym t w warstwie 0-50 cm [%],
 $\delta_{i,t}$ – wilgotność względna w profilu pomiarowym i w terminie pomiarowym t w warstwie 0-50 cm [-].

Równania zastosowane do obliczenia średniej oraz odchylenia standardowego wilgotności względnej podano w pracy U. Somorowskiej i J. Piętki (2010).

Na podstawie średniej wilgotności względnej można zidentyfikować profile pomiarowe, które systematycznie reprezentują warunki wilgotności zbliżone do średniej obszarowej bądź są od niej niższe lub wyższe. Profile ze średnią wilgotnością względną bliską zera mają uwilgotnienie bliskie średniej dla badanego obszaru. Wartości większe od zera są charakterystyczne dla profili wykazujących uwilgotnienie większe od średniej obszarowej, a mniejsze od zera dla profili o małej wilgotności. Odchylenie standardowe wilgotności względnej wskazują na różnice między zmiennością w czasie uwilgotnienia w danym profilu a zmiennością średniego uwilgotnienia na danym obszarze. Profile pomiarowe, dla których odchylenie standardowe jest bliskie zera charakteryzują się dużą stabilnością czasową uwilgotnienia.

Przyjmując założenie niezmienności w czasie przestrzennej struktury warunków wilgotnościowych, opracowano model przestrzennej struktury uwilgotnienia

gleby. Uwzględniono punktową informację o uwilgotnieniu gleby, a także zróżnicowanie przestrzenne czynników kształtujących stan retencji. Wybrano trzy czynniki: topografię, uziarnienie oraz roślinność. W analizie nie uwzględniono położenia zwierciadła wody podziemnej ze względu na trudności w parametryzacji tego czynnika, wynikające przede wszystkim z braku dokładnych danych. Można jednak przyjąć, że ukształtowanie pierwszego, swobodnego zwierciadła wody podziemnej zależy od ukształtowania powierzchni terenu, zatem czynnik ten jest reprezentowany w modelu pośrednio.

Podstawę modelu struktury przestrzennej uwilgotnienia stanowił topograficzny wskaźnik wilgotności TWI (Beven, Kirkby 1979). W pierwotnej wersji wskaźnik TWI stanowi matematyczną parametryzację stanu uwilgotnienia gleby wyrażoną funkcją nachylenia stoków i powierzchni obszaru zasilającego daną komórkę. Jest on obliczany za pomocą równania:

$$TWI = \ln \frac{As}{\tan\beta} \quad (3)$$

gdzie: As – powierzchnia obszaru zasilającego daną komórkę podzielona przez bok komórki [$m^2 \cdot m^{-1}$],
 β – kąt nachylenia stoku [rad],
 TWI – topograficzny wskaźnik wilgotności.

Wskaźnik TWI pozwala na oszacowanie tendencji do gromadzenia wody opadowej lub roztopowej w danej komórce zlewni. Zgodnie z równaniem (3), im większy obszar zasilania i mniejszy kąt nachylenia stoku, tym większy jest wskaźnik TWI, czyli większe uwilgotnienie. Zatem, uwzględniając topografię, obszarami predysponowanymi do gromadzenia wody w glebie są obszary płaskie o dużym obszarze zasilania. Wskaźnik TWI jest liczbą niemianowaną i nie ma wymiaru wielkości fizycznej.

Temimi i in. (2010) zaproponowali nową wersję wskaźnika TWI, który dodatkowo uwzględnia zróżnicowanie przestrzenne roślinności. Klasyczny wskaźnik TWI został przekształcony do następującej postaci:

$$TWI_{mod\ 1} = \ln(As) - \ln(As \cdot \tan\beta) \cdot e^{-\mu \cdot LAI} \quad (4)$$

gdzie: $TWI_{mod\ 1}$ – topograficzny wskaźnik wilgotności uwzględniający wpływ roślinności,
 μ – parametr gęstości roślinności [-],
 LAI – współczynnik powierzchni liścia [$m^2 \cdot m^{-2}$].

Obecne w równaniu (4) zróżnicowanie roślinności opisano wskaźnikiem LAI. Mapa wskaźnika LAI, wykorzystana w dalszych obliczeniach, powstała na podstawie jego średnich wartości obliczonych z 23 terminów w okresie od maja do października 2010 r. Parametr μ przyjęto w uproszczeniu jako wartość stałą równą 0,45 dla całego badanego obszaru. Może on się zawierać w zakresie od 0,35 dla roślinności trawiastej i 0,40 dla upraw do około 0,50-0,77 dla lasów (Eagleson 1982).

DANE EMPIRYCZNE WILGOTNOŚCI OBJĘTOŚCIOWEJ GLEBY

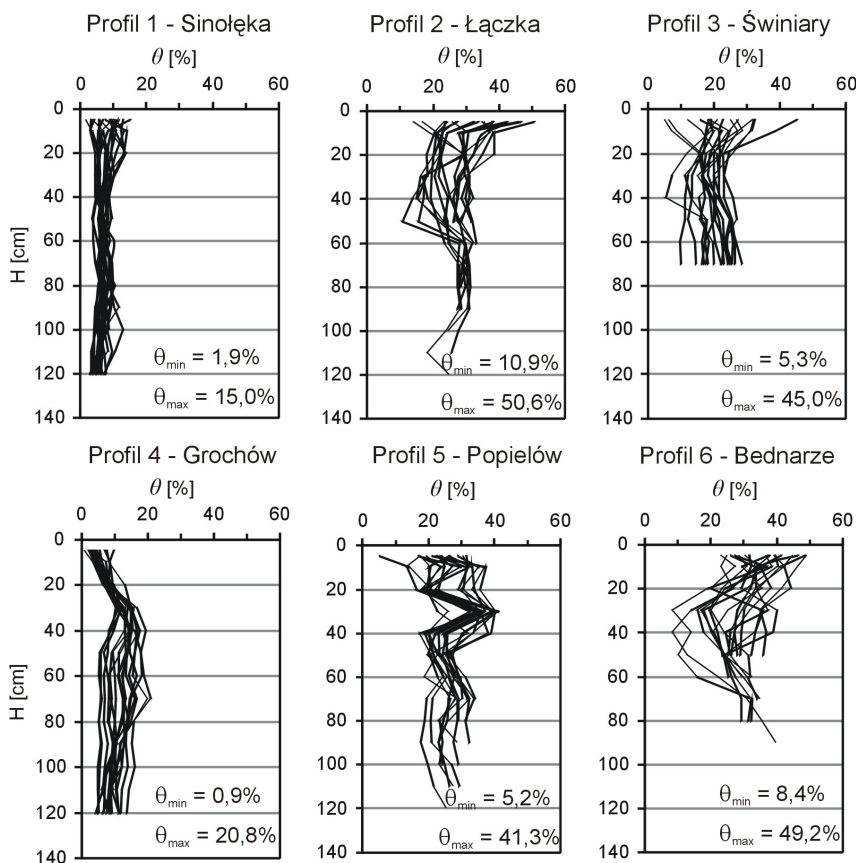
Wilgotność objętościową sześciu profili glebowych we wszystkich terminach pomiarowych zobrazowano w postaci profili wilgotnościowych na rycinie 2. Najmniejszym uwilgotnieniem wyróżniają się profile Sinołęka i Grochów. Wilgotność objętościowa gleby w profilu Sinołęka w żadnym terminie pomiarowym nie przekroczyła 15%, a w profilu Grochów tylko raz nieznacznie przekroczyła 20%. Minimalna wilgotność objętościowa w profilu Sinołęka wyniosła 1,9%, natomiast w profilu Grochów – 0,9%. Wartości te wydają się jednak zbyt niskie. Należy zauważyć, że błąd pomiaru zastosowanego miernika TDR wynosi $\pm 2\%$ (*Instrukcja obsługi...* 2008). Oba profile zbudowane są głównie z piasku luźnego. Środkowa część profilu Grochów cechuje się większą zawartością frakcji drobniejszych co przyczynia się do podwyższenia wilgotności. O niskim uwilgotnieniu profili Sinołęka i Grochów decyduje również ich wysoczyznowe położenie. Punkty pomiarowe leżą na niewielkich wzniesieniach. Ponadto do głębokości 120 cm nie zaobserwowano w nich zwierciadła wody podziemnej.

Profil Świniary również zlokalizowany jest na wzniesieniu i do głębokości 140 cm nie zaobserwowano w nim zwierciadła wody podziemnej. Jednak jego uwilgotnienie jest zdecydowanie wyższe niż profili Sinołęka i Grochów, co wynika z większego udziału frakcji drobniejszych – pyłu i iłu. W przypowierzchniowej warstwie profil Świniary zbudowany jest z gliny piaszczystej, a poniżej z piasku gliniastego.

Pozostałe profile charakteryzują się wysoką wilgotnością przekraczającą nawet 40% (Popielów) i bliską 50% (profile: Łączka i Bednarze). Ich uziarnienie jest jednak zróżnicowane. Profil Łączka zbudowany jest w górnej części z piasku słabogliniastego, a na głębokości poniżej 50 cm z gliny piaszczysto-ilastej. Profile Popielów i Bednarze zbudowane są zaś z piasków, z przewagą piasku luźnego. Na wysokie uwilgotnienie tych profili wpływa głównie ich lokalizacja. Położone są one bowiem w dnach płaskich dolin rzecznych. Obserwowano w nich duże wahania zwierciadła wody podziemnej. Są one zatem dodatkowo zasilane wodą podziemną dopływającą z wysoczyzn.

Uzyskane wyniki wskazują na znaczne różnice w wilgotności analizowanych profili glebowych. Powstaje zatem pytanie: czy zgodnie z założeniem koncepcji stabilności czasowej poszczególne profile, mimo wyraźnego zróżnicowania wilgotności, wykazują zbliżoną czasową dynamikę uwilgotnienia.

Rycina 3 przedstawia średnie wilgotności względne uporządkowane w kolejności rosnącej oraz zakres odchyłeń standardowych obliczone dla profili pomiarowych i dla warstwy o miąższości 0-50 cm. Wilgotnością objętościową najbardziej zbliżoną do średniej obszarowej wyróżnia się profil Świniary. Można uznać, że reprezentuje on średnie uwilgotnienie obszarowe. Profile Sinołęka i Grochów są bardziej suche od średniej obszarowej, a profile Łączka, Popielów i Bednarze – wilgotniejsze. Największą stabilnością czasową charakteryzuje się profil Łączka, który ma najmniejsze odchylenie standardowe. Najmniejszą stabilnością czasową wyróżnia się zaś profil Świniary.



Ryc. 2. Profile wilgotnościowe gleb: θ – wilgotność objętościowa, θ_{min} – minimalna wilgotność objętościowa, θ_{max} – maksymalna wilgotność objętościowa, H – głębokość
Fig. 2. Soil moisture profiles: θ – volumetric soil moisture, θ_{min} – minimum volumetric soil moisture, θ_{max} – maximum volumetric soil moisture, H – depth

Przeprowadzona analiza wykazała, że mimo przestrzennego zróżnicowania warunków wilgotnościowych reprezentowanych przez profile glebowe, można przyjąć hipotezę o niezmienności w czasie przestrzennej struktury uwilgotnienia obszaru.

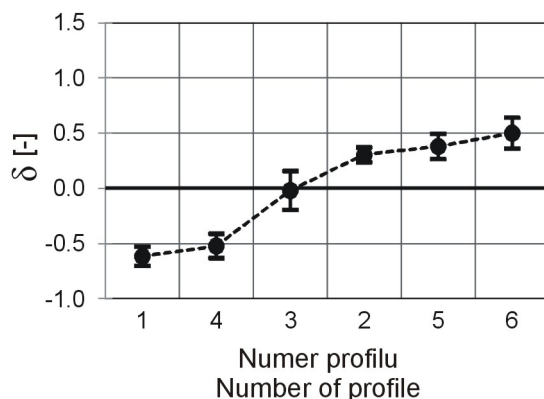
MODYFIKACJA WSKAŹNIKA TWI NA PODSTAWIE DANYCH EMPIRYCZNYCH

Modyfikacja wskaźnika TWI polegała na uwzględnieniu zarówno wpływu topografii i roślinności, jak również zróżnicowania wynikającego z różnych możliwości retencyjnych utworów budujących strefę aeracji zlewni. Wymagało to dokonania parametryzacji uziarnienia gleb ze względu na ich właściwości reten-

cyjne. Celem było ustalenie względnych współczynników uwilgotnienia (WWU) dla poszczególnych podgrup granulometrycznych gleb, występujących w zlewni Liwca. Założono, że współczynniki powinny wskazywać ile razy gleba z danej podgrupy granulometrycznej może być bardziej wilgotna bądź bardziej sucha od innej, w zbliżonych warunkach topograficznych, roślinnych i meteorologicznych. W praktyce jest to zadanie niezwykle trudne ze względu na dużą liczbę czynników, które mogą decydować o zdolnościach retencyjnych gleb oraz ograniczoną ilość dostępnych danych empirycznych.

Dysponując własnymi oznaczeniami laboratoryjnymi uziarnienia gleb oraz pomiarami wilgotności objętościowej gleby, podjęto próbę określenia różnic w uwilgotnieniu osadów, reprezentujących różne podgrupy granulometryczne. Skupiono się na różnicach pomiędzy uwilgotnieniem piasku luźnego, piasku słabogliniastego oraz piasku gliniastego lekkiego, ponieważ ich udział w powierzchni zlewni jest największy. Razem osady te zajmują około 70% jej powierzchni. Wykazano, że poszczególne warstwy osadów profili zbudowanych z piasku słabogliniastego były średnio ok. 1,6 razy bardziej wilgotne niż warstwy zbudowane z piasku luźnego. Maksymalne ich uwilgotnienie było natomiast aż 2 razy większe. Piasek gliniasty lekki był zaś średnio ok. 3-krotnie bardziej wilgotny niż piasek luźny.

Na podstawie analizy wyników pomiarów terenowych oraz literaturowych danych polowej pojemności wodnej różnych podgrup granulometrycznych (Gutry-Korycka 1996; Walczak i in. 2002; Sławiński 2003) określono względne współczynniki uwilgotnienia dla poszczególnych podgrup granulometrycznych występujących w zlewni Liwca (tab. 1). Dla piasku luźnego wartość względnego współczynnika uwilgotnienia jest równa 1, a następnie odniesiono do niej



Ryc. 3. Średnia wilgotność względna w sześciu profilach pomiarowych w warstwie 0-50 cm (zaznaczono przedział $\pm\delta$): δ - wilgotność względna; numery profili: 1 – Sinołęka, 2 – Łączka, 3 – Świniary, 4 – Grochów, 5 – Popielów, 6 – Bednarze

Fig. 3. Mean relative soil moisture in six profiles in the layer 0-50 cm (indicated range $\pm\delta$): δ - relative soil moisture; numbers of profile: 1 – Sinołęka, 2 – Łączka, 3 – Świniary, 4 – Grochów, 5 – Popielów, 6 – Bednarze

współczynniki dla pozostałych osadów. Ich wartości mieszczą się w zakresie od 1 (żwir piaszczysty) do 4,5 (torf).

Tabela 1. Względne współczynniki uwilgotnienia (WWU) w podgrupach granulometrycznych osadów

Table 1. Relative coefficients of soil moisture associated with a grain size composition sub-group

Podgrupa granulometryczna	Wartość komórki rastra mapy uziarnienia	Współczynnik WWU
żwir piaszczysty	1	1
piasek luźny	2	1
piasek słabogliniasty	3	2
piasek słabogliniasty pylasty	4	2,5
piasek gliniasty lekki	5	3
piasek gliniasty lekki pylasty	6	3,5
piasek gliniasty mocny	7	3
piasek gliniasty mocny pylasty	8	3,5
pył zwykły	9	3,5
pył ilasty	10	3,5
glina lekka	11	3,5
glina lekka pylasta	12	4
glina średnia	13	4
torf	14	4,5

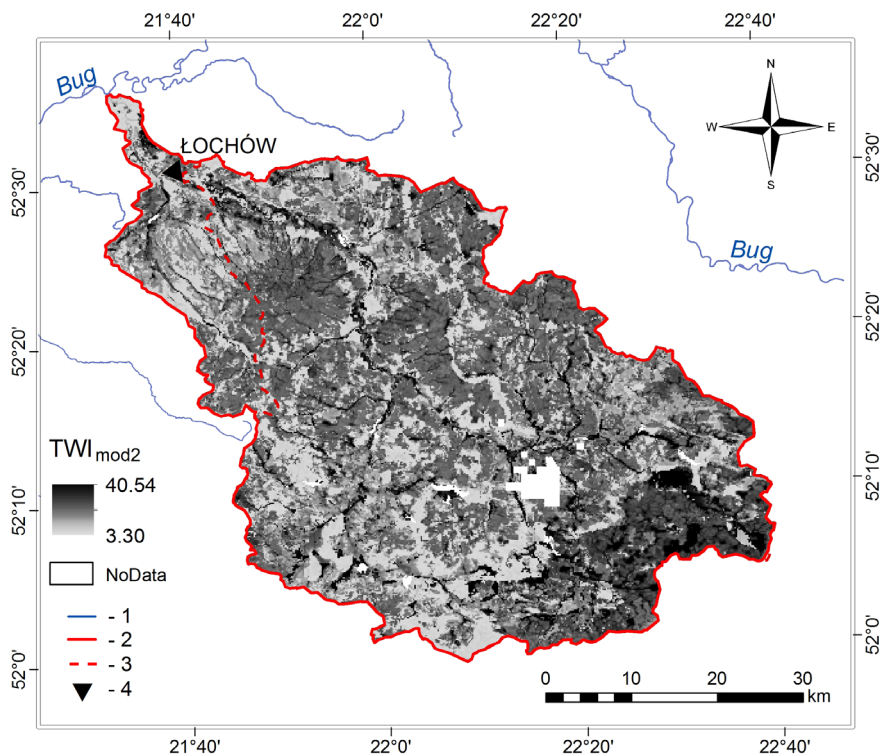
Źródło danych o podgrupach granulometrycznych w zlewni Liwca: cyfrowa mapa glebowo-rolnicza w skali 1: 50 000 oraz leśna mapa numeryczna (LMN)

Source of data on a grain size composition sub-group in the Liwiec catchment: digital agricultural soil map at a scale of 1: 50 000 and forest digital map (LMN)

Zgodnie z mapą glebowo-rolniczą oraz leśną mapą numeryczną utwory powierzchniowe w zlewni Liwca do głębokości 50 cm zbudowane są przeważnie z piasku. Podgrupy piasków luźnego, słabogliniastego oraz gliniastego lekkiego i mocnego zajmują razem około 86% powierzchni zlewni. Pozostała część zlewni zbudowana jest głównie z pyłu zwykłego (4,32%), gliny lekkiej (2,91%) oraz torfów (3,60%). Na podstawie mapy podgrup granulometrycznych osadów obecnych w warstwie 0-50 cm wykonano mapę współczynników WWU, którą następnie przemnożono przez mapę wskaźnika TWI_{mod1} . W ten sposób powstała mapa wskaźnika TWI_{mod2} , który uwzględni wpływ topografii, roślinności oraz zdolności retencyjnych osadów.

Rycina 4 przedstawia mapę wskaźnika TWI_{mod2} w zlewni Liwca. Wskaźnik waha się od 3,32 do 40,54, przy średniej i medianie równych, odpowiednio 12,79 i 13,26. Wskaźniki, przekraczające 30, wskazujące na duże potencjalne uwilgotnienie gleby, charakteryzują dwa typy obszarów. Układają się liniowo w dnach dolin rzecznych, tworząc na mapie obraz powielający strukturę sieci rzecznej, albo tworzą rozległe powierzchnie w południowo-wschodniej części zlewni, a więc tam gdzie występują osady o dużej zawartości frakcji drobnych – przede wszystkim pyły i torfy. W obu przypadkach są to zatem tereny płaskie zbudowane z utworów o dużych zdolnościach retencyjnych.

Małe wskaźniki uwilgotnienia mają obszary o relatywnie dużych spadkach i zbudowane z piasku luźnego. Najmniejsze wartości wskaźnika charakteryzują środkowo-wschodnią część zlewni (Wysoczyzna Kałuszyńska i Wysoczyzna Siedlecka). Występują tam największe w zlewni nachylenia stoków (ponad 4°). Warto podkreślić, że zróżnicowanie przestrzenne roślinności, występujące w zlewni Liwca, jest na mapie słabo zarysowane.



Ryc. 4. Zmodyfikowany wskaźnik TWI_{mod2} w zlewni Liwca: 1 – ciek, 2 – dział wodny zlewni Liwca, 3 – dział wodny zlewni Liwca do profilu w Łochowie, 4 – stacja wodowskazowa

Fig. 4. The modified index TWI_{mod2} in the catchment Liwiec: 1 – river, 2 – watershed of Liwiec catchment, 3 – watershed of Liwiec catchment to a gauging profile in Łochów, 4 – water gauge

ZRÓŻNICOWANIE PRZESTRZENNE ZASOBÓW WODNYCH STREFY AERACJI

Zróźnicowanie przestrzenne wskaźnika $TWI_{\text{mod}2}$ przyjęto jako model struktury przestrzennej warunków wilgotnościowych w zlewni Liwca. Wskaźnik ten użyto do oceny uwilgotnienia zlewni w warstwie 0-50 cm. W tym celu przeskalowano liniowo jego wartości biorąc za podstawę wilgotność objętościową określoną w sześciu profilach pomiarowych. Przeskalowania dokonano za pomocą układu równań (5) i (6) przy założeniu, że relacja między miarami wilgotności objętościowej (θ) i TWI jest stała:

$$\theta_W = \left(\frac{\theta_i - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \right) \quad (5)$$

$$TWI_W = \left(\frac{TWI_i - TWI_{\min}}{TWI_{\max} - TWI_{\min}} \right) \quad (6)$$

gdzie: θ_W – względna wilgotność objętościowa gleby [-],
 θ_i – wilgotność objętościowa gleby w punkcie i [%],
 θ_{\max} – wilgotność objętościowa profilu najwilgotniejszego [%],
 θ_{\min} – wilgotność objętościowa profilu najsuchszego [%],
 TWI_W – względna wartość wskaźnika [-],
 TWI_i – wartość wskaźnika w punkcie i [-],
 TWI_{\min} – minimalna wartość wskaźnika spośród wartości w komórkach rastra odpowiadających lokalizacji profili glebowych [-],
 TWI_{\max} – maksymalna wartość wskaźnika spośród wartości w komórkach rastra odpowiadających lokalizacji profili glebowych [-].

Zakładając, że wartości względne uzyskane z równań (5) i (6) w danej komórce rastra są sobie równe, wilgotność objętościową dla tej komórki obliczono zgodnie z równaniem:

$$\theta_i = \left(\frac{TWI_i - TWI_{\min}}{TWI_{\max} - TWI_{\min}} \right) \cdot (\theta_{\max} - \theta_{\min}) + \theta_{\min} \quad (7)$$

Wartości TWI_{\min} i TWI_{\max} zgodnie z mapą wskaźnika $TWI_{\text{mod}2}$ wynosiły odpowiednio 3,30 i 40, 54. Jako wartości θ_{\min} i θ_{\max} przyjęto wartości odpowiednio 7,7% oraz 30,6%. Odpowiadają one średniej wilgotności objętościowej w warstwie 0-50 cm profilu najsuchszego (Sinołęka) oraz profilu najwilgotniejszego (Bednarze). Takie przeskalowanie umożliwia określenie wilgotności objętościowej poza analizowanym zakresem wartości ustalonym przez maksymalną i minimalną wilgotność pomierzoną w punktach.

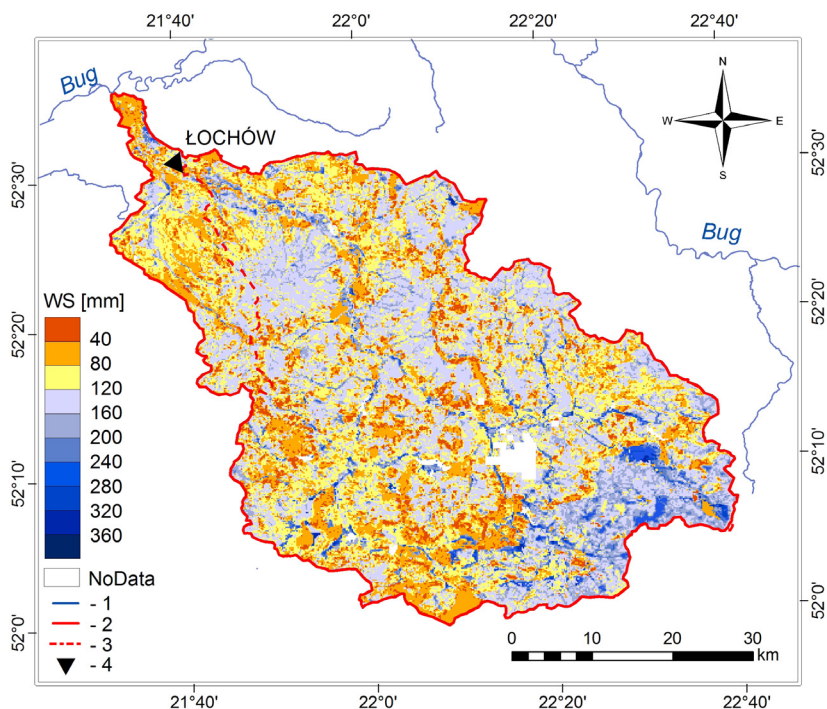
Na podstawie mapy uwilgotnienia gleby obliczono średnie uwilgotnienie gleby w warstwie 0-50 cm, a następnie przeliczono je na zapas wody zgodnie z równaniem:

$$WS = \frac{\theta_{0-50cm} \cdot \Delta z}{10} \quad (8)$$

gdzie: WS – zapas wody [mm],
 Δz – miąższość profilu glebowego [cm].

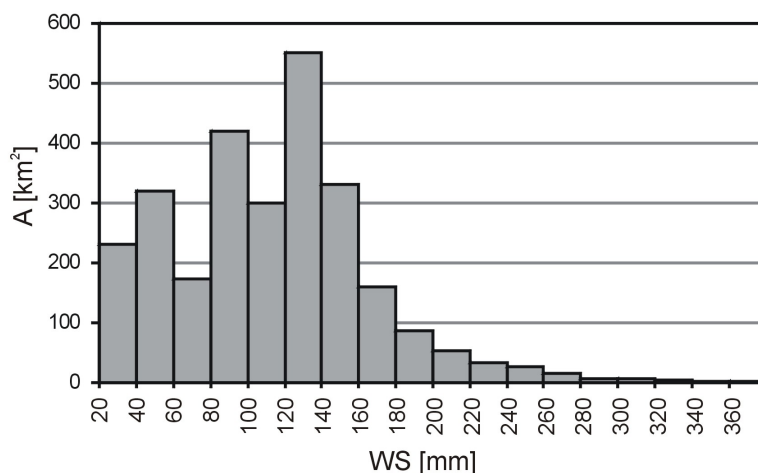
Rycina 5 przedstawia model średniego zapasu wody w warstwie 0-50 cm zlewni Liwca. Zapasy wody powyżej 240 mm są charakterystyczne dla dolin rzecznych i terenów w południowo-wschodniej części zlewni. W okresie badań terenowych zapas wody warstwy 0-50 cm przekraczał w tej części zlewni średnio 160 mm, a miejscami wynosił ponad 280 mm. Na obszarze torfowisk i mokradeł w dolinie górnego Liwca wynosił ponad 300 mm. Najniższy stan retencji strefy aeracji w warstwie 0-50 cm o wartości poniżej 80 mm zidentyfikowano miejscami w północno-zachodniej oraz południowo-zachodniej części zlewni. Są to obszary o niskich możliwościach retencyjnych, zatem szczególnie zagrożone suszą glebową. Średni zapas wody w warstwie 0-50 cm dla całej zlewni Liwca wynosi 113 mm.

Udział w całkowitej powierzchni zlewni Liwca obszarów o określonym przedziale zapasu wody w warstwie 0-50 cm zaprezentowano na rycinie 6. Prawie 550 km² powierzchni zlewni (ok. 20%) zajmują obszary, w których średni zapas wody zawiera się w przedziale od 120 do 140 mm. Wartości wyższe niż 200 mm występują na 147 km² powierzchni (ok. 5%). Prawie 1450 km² (ok. 52%) zlewni charakteryzuje się zapasem wody mniejszym niż 100 mm.



Ryc. 5. Średni zapas wody w zlewni Liwca w warstwie 0-50 cm: 1 – ciek, 2 – dział wodny zlewni Liwca, 3 – dział wodny zlewni Liwca do profilu w Łochowie, 4 – stacja wodowskazowa

Fig. 5. Mean values of soil water storage in the layer 0-50 cm: 1 – river, 2 – watershed of Liwiec catchment, 3 – watershed of Liwiec catchment to a gauging profile in Łochów, 4 – water gauge



Ryc. 6. Udział obszarów o określonym przedziale wartości zapasu wody w warstwie 0-50 cm w całkowitej powierzchni zlewni Liwca: A – powierzchnia, WS – zapas wody w warstwie 0-50 cm

Fig. 6. Share of areas with particular range of values of water storage in the layer 0-50 cm in the Liwiec catchment: A – area, WS – water storage in the layer 0-50 cm

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podjęte badania stanowią próbę oceny zróżnicowania przestrzennego uwilgotnienia gleby na podstawie punktowych danych empirycznych oraz parametryzacji czynników, które decydują o warunkach wilgotnościowych w zlewni Liwca. Wyniki badań eksperymentalnych wykazały znaczne zróżnicowanie wilgotności objętościowej. Najniższą wilgotność pomierzono w profilach położonych na stokach o niewielkim nachyleniu i zbudowanych z piasków luźnych i słabogliniastych, najwyższą – w profilach położonych w dolinach rzecznych z płytkim występowaniem zwierciadła wody podziemnej. Zidentyfikowane różnice zasobów wodnych strefy aeracji można w tej zlewni przypisać przede wszystkim topografii, uziarnieniu oraz położeniu zwierciadła wody podziemnej. Mimo przestrzennego zróżnicowania, uwilgotnienie profili glebowych charakteryzuje się stabilnością czasową, co wskazuje na istnienie niezmiennej w czasie struktury przestrzennej warunków wilgotnościowych w zlewni Liwca. Pozwoliło to opracować model tej struktury, który umożliwił wskazanie obszarów o dużych możliwościach retencyjnych oraz obszarów narażonych na niedobory wilgoci glebowej. Do obszarów, które mogą okresowo charakteryzować się nadmiarem wody należą: południowo-wschodnia część zlewni oraz doliny rzeczne. Z kolei szczególnie zagrożone suszami glebowymi są obszary położone poza obniżeniami terenu, zbudowane z osadów gruboziarnistych i występujące miejscami w północno-zachodniej oraz południowo-zachodniej części zlewni.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zaproponowana procedura skalowania punktowych danych empirycznych z wykorzystaniem statycznego modelu struktury przestrzennej uwilgotnienia gleby może być przydatna w szacowaniu zasobów wodnych strefy aeracji w skali zlewni. W dalszych badaniach wskazane byłoby podjęcie próby weryfikacji opracowanego modelu zróżnicowania przestrzennego uwilgotnienia gleby poprzez porównanie z przestrzennymi danymi satelitarnymi, których rozdzielczość oraz jakość stale się poprawiają.

PODZIĘKOWANIA

Autorka składa serdeczne podziękowania dr hab. Urszuli Somorowskiej, prof. UW za wsparcie merytoryczne i rady udzielane podczas prowadzonych badań oraz recenzentom artykułu za cenne uwagi i sugestie.

Literatura

- Beven K.J., Kirkby M.J., 1979, A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 1, 43-69.
- Blöschl G., 2001, Scaling in hydrology, *Hydrological Processes*, 15, 709-711.
- Crave A., Gascuel-Oudou C., 1997, The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content, *Hydrological Processes*, 11(2), 203-210.
- Czarnecka H., Dobrowolski A., Głowacka B., Hołdakowska J., Krupa-Marchlewska J., 2006, Mapa cyfrowa podziału hydrograficznego Polski i jej zastosowania, [w:] M. Groń (red.), *Zastosowanie GIS w meteorologii i gospodarce wodnej*, IMGW, Warszawa, 133-150.
- Eagleson P.S., 1982, Ecological optimality in water-limited natural soil-vegetation systems: 1. Theory and hypothesis, *Water Resources Research*, 18, 2, 325-340.
- Grabs T., Seibert J., Bishop K., Laudon H., 2009, Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model, *Journal of Hydrology*, 373, 15-23.
- Grayson R.B., Western A.W., Chiew F.H., Blöschl G., 1997, Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls, *Water Resources Research*, 33(12), 2897-2908.
- Gutry-Korycka M., 1996, Cechy fizycznogeograficzne badanych zlewni, [w:] M. Gutry-Korycka (red.), *Studia nad wpływem globalnych zmian klimatu na obieg wody w zlewni*, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski, Warszawa, 46-52.
- Gutry-Korycka M., 2001, Rola skali w geoekosystemach, [w:] A. Karczewski, Z. Zwoliński (red.), *Funkcjonowanie geoekosystemów w warunkach morfoklimatycznych - monitoring, ochrona, edukacja*, Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich, Poznań, 157-176.
- Instrukcja obsługi FOM/mts i TDR/MUX/mpts, wersja 1.2, 2008, Instytut Agrofizyki Polskiej Akademii Nauk, Lublin.
- Jasper K., Calanca P., Fuhrer J., 2006, Changes in summertime soil water patterns in complex terrain due to climatic change, *Journal of Hydrology*, 327(3), 550-563.
- Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E., 2008, Hole-filled SRTM for the globe Version 4, CGIAR-CSI SRTM 90m Database, dostępny na stronie internetowej: <http://srtm.csi.cgiar.org> (03.09.2013).

- Martínez-Fernández J., Ceballos A., 2003, Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain, *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1647-1656.
- Myneni R., Knyazikhin Y., Glassy J., Votava P., Shabanov N., 2003, FPAR, LAI (ESDT: MOD15A2) 8-day Composite NASA MODIS Land Algorithm, User's Guide, Terra MODIS Land Team, dostępny na stronie internetowej: <http://cybele.bu.edu/modismisr/products/modis/userguide.pdf> (12.08.2013).
- Piętka I., 2013, Sezonowa i wieloletnia zmienność zasobów wodnych strefy aeracji w zlewni nizinnej, praca doktorska, maszynopis w bibliotece Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Polskie Towarzystwo Gleboznawcze (PTG), 1956, Przyrodniczo-genetyczna klasyfikacja gleb Polski, ze szczególnym uwzględnieniem gleb uprawnych zatwierdzona przez Komisję Klasyfikacji Nomenklatury i Kartografii Gleb w dniu 27 maja 1955 roku, *Roczniki Nauk Rolniczych*, 74-D, Warszawa.
- Polskie Towarzystwo Gleboznawcze (PTG), 1989, Systematyka gleb Polski, *Roczniki Gleboznawcze*, 40, 3/4.
- Polskie Towarzystwo Gleboznawcze (PTG), 2009, Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych PTG 2008, *Roczniki Gleboznawcze*, 60, 2, 5-16.
- Polskie Towarzystwo Gleboznawcze (PTG), 2011, Systematyka gleb Polski, *Roczniki Gleboznawcze*, 66, 2.
- Ryzak M., Bartmiński P., Bieganowski A., 2009, Metody wyznaczania rozkładu granulometrycznego gleb mineralnych, *Acta Agrophysica, Rozprawy i Monografie*, 175, Lublin.
- Schär C., Lüthi D., Beyerle U., Heise E., 1999, The soil-precipitation feedback: A process study with a regional climate model, *Journal of Climate*, 12, 722-741.
- Scipal K., Scheffler C., Wagner W., 2005, Soil moisture-runoff relation at the catchment scale as observed with coarse resolution microwave remote sensing, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2, 417-448.
- Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B., Lehner I., Orlowsky B., Teuling A.J., 2010, Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review, *Earth-Science Reviews*, 99, 125-161.
- Skierucha W., Malicki M., 2004, Zintegrowany przełącznik mikrofalowy w systemie automatycznego pomiaru wilgotności gleby metodą TDR, *Acta Agrophysica*, 4(3), 803-808.
- Skierucha W., Wilczek A., 2007, Polowy system monitorowania wilgotności gleb, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 53, 9bis, 342-345.
- Sławiński C., 2003, Wpływ fizycznych parametrów gleby na wartości współczynnika przewodnictwa wodnego (Badania modelowe), *Acta Agrophysica, Rozprawy i Monografie*, 90, Instytut Agrofizyki PAN, Lublin.
- Somorowska U., 2006, Wpływ stanu retencji podziemnej na proces odpływu w zlewni nizinnej, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Somorowska U., 2009, Wzrost zagrożenia suszą hydrologiczną w różnych regionach geograficznych Polski w XX wieku, *Prace i Studia Geograficzne*, 43, 99-114.
- Somorowska U., Piętka I., 2010, Dynamika wód strefy aeracji w zlewni nizinnej w świetle koncepcji stabilności czasowej, [w:] A. Magnuszewski (red.), Tom 2: Hydrologia w ochronie i kształtowaniu środowiska, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Krajowy Kongres Hydrologiczny, 69, 205-213.
- Starks P.J., Heathman G.C., Jackson T., Cosh M., 2006, Temporal stability of soil moisture profile, *Journal of Hydrology*, 324 (1), 400-411.

- Temimi M., Leconte R., Chaouch N., Sukumal P., Khanbilvardi R., Brissette F., 2010, A combination of remote sensing data and topographic attributes for the spatial and temporal monitoring of soil wetness, *Journal of Hydrology*, 388, 28-40.
- Teuling A.J., Troch P.A., 2005, Improved understanding of soil moisture variability dynamics, *Geophysical Research Letters*, 32(5), L05404.
- Vachaud G., Passerat de Silans A., Balabanis P., Vauclin M., 1985, Temporal Stability of Spatially Measured Soil Water Probability Density Function, *Soil Science Society of America Journal*, 49, 822-828.
- Vinogradov Y.B., Semenova O.N., Vinogradova T.A., 2011, An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system, *Hydrological Processes*, 25, 1055-1073.
- Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C., 2002, Hydrofizyczne charakterystyki gleb ornycy Polski, *Acta Agrophysica Monografie*, 74, Lublin.
- Zhao Y., Peth S., Wang X.Y., Lin H., Horn R., 2010, Controls of surface soil moisture spatial patterns and their temporal stability in a semi-arid steppe, *Hydrological Processes*, 24(18), 2507-2519.

Summary

The knowledge of soil moisture spatial variability is an important issue for hydrological and climatic studies. The purpose of this study was to evaluate the spatial distribution of soil water resources in a lowland basin. The area chosen for study is the Liwiec basin (left tributary of the Bug river), situated in central Poland. The analysis is based on field measurements of volumetric soil moisture conducted since 2009 till 2011. Soil moisture measurements were performed at six locations in the Liwiec basin. The measurements were carried out using a portable time domain reflectometer (TDR). Empirical soil moisture data was used to verify the hypothesis of temporal stability of soil moisture. The concept of temporal stability proposed in pedohydrology in the 80s of the twentieth century by G. Vachaud et al. (1985), presupposes the existence of the relationship between the soil moisture indicators at a point and the values representing the spatial averages. Assuming temporal stability of soil moisture in the Liwiec basin a method of evaluation of soil moisture spatial distribution has been developed based on field measurements and spatial data (i.e. DEM, digital agricultural soil map, forest digital map). Parameterization of the factors influencing the variability of soil moisture (topography, particle size distribution of soils and density of vegetation) was made based on the topographic wetness index (TWI). The modified TWI index was considered a static model of the spatial structure of soil moisture in the Liwiec basin. By integrating this spatial model and the results of field measurements, soil moisture maps were developed.