

Koncepcja metody identyfikacji wymuszeń związanych z górną powierzchnią brzegową systemów wodonośnych z wykorzystaniem teledetekcji satelitarnej

Daniel Zaszewski¹

A concept of method to identify boundary conditions on the top surface of aquifer systems with the use of satellite remote sensing. Prz. Geol., 63: 1140–1144.

Abstract. One of the main problems encountered by the creators of the groundwater flow models is the high uncertainty of the data used to construct the input array. The group of information, which is characterized by the uncertainty is the data which describe groundwater recharge. The usage of the traditional methods of estimating groundwater recharge is associated with some serious limitations especially in the analysis of the aquifer systems on a regional scale.

A chance to increase the reliability of the input data is the use of satellite remote sensing. This paper presents the concept of a method allowing the estimation of the most important factors which determine groundwater recharge process, such as evapotranspiration, interception, surface and underground retention. The method is based on the analysis of the satellite images in different ranges of the spectrum. The Developed method will undergo a verification process for properly selected research training ground. The Verification tool will be a numerical model of the groundwater flow.

Keywords: satellite remote sensing, boundary surface, groundwater recharge, numerical model of groundwater flow

Jedną z podstawowych trudności przy tworzeniu modeli przepływu wód podziemnych jest zgromadzenie danych wejściowych, które w dokładny i wiarygodny sposób opisywałyby zarówno modelowany system, jak i jego interakcje z otoczeniem. Grupą elementów cechujących się wysoką niepewnością są dane związane z górną powierzchnią brzegową systemu wodonośnego. Powierzchnia brzegowa jest to element systemu oddzielający go od otoczenia. Z jednej strony określa ona geometrię systemu, z drugiej zaś opisuje jego relacje z otoczeniem (Szymanko, 1980). Geometria górnej powierzchni brzegowej jest czytelna – stanowi ją powierzchnia topograficzna, jednak opis wymuszeń z nią związanych nasyca istotnych problemów. Na wymuszenia związane z górną powierzchnią brzegową składają się przede wszystkim parametry związane z kształtowaniem wysokości zasilania wód podziemnych przez infiltrację opadów atmosferycznych (Macioszczyk, 1999).

Wielkość zasilania jest kształtowana przez szereg czynników, zmiennych w czasie i przestrzeni, które można podzielić na dwie grupy. Pierwsza z nich jest związana ze zjawiskami atmosferycznymi, do których należy zaliczyć temperaturę powietrza, wysokość opadów atmosferycznych i ich rozkład w czasie, parowanie terenowe (Soczyńska, 1989), prędkość wiatru oraz parowanie i kondensację wody w strefie aeracji (Pazdro & Kozerski, 1990). Druga grupa wiąże się z właściwościami ośrodka skalnego tworzącego strefę aeracji oraz ukształtowaniem i zagospodarowaniem terenu – przepuszczalnością ośrodka skalnego, nachyleniem powierzchni terenu, pokryciem szatą roślinną, przemarzaniem gruntu, stopniem nasycenia wodą porów ośrodka gruntowego i działalnością człowieka (Soczyńska, 1989).

Istnieje wiele technik wykorzystywanych do określania wielkości wymuszeń górnej powierzchni brzegowej. Bazują one na analizie danych charakteryzujących strefę wód powierzchniowych, strefę aeracji oraz saturacji (Scanlon i in., 2002). Najdokładniejszych wyników dostarczają badania prowadzone przy użyciu lizymetrów (Byczkowski,

1999). Jednak wartości oznaczone tą metodą są miarodajne tylko dla lokalnych warunków geomorfologicznych, geologicznych, hydrologicznych, fenologicznych i meteorologicznych (Pazdro & Kozerski, 1990). Lizymetry generują jedynie wartości punktowe, w ich przypadku nie ma również dostępu do długich ciągów pomiarowych. Kolejna grupa metod bazuje na określeniu wielkości zasilania przez zastosowanie systemu rang i wag korygujących wartości wskaźnika infiltracji efektywnej w odniesieniu do litologii, morfologii terenu oraz jego pokrycia i zagospodarowania (Duda i in., 2011). Duża schematyzacja parametrów użytych w metodach rangowych powoduje to, że nie są one w stanie, z należytą dokładnością, uchwycić przestrzennej niejednorodności środowiska. Istnieje również grupa metod określająca wartości funkcji zasilania na podstawie bilansu wodnego badanego systemu. Polegają one na podziale systemu krążenia wód na dwa podsystemy obejmujące system krążenia powierzchniowy i podziemny (Byczkowski, 1999). Metody te wymagają precyzyjnego oszacowania poszczególnych elementów bilansowania, co jest problematyczne zwłaszcza w odniesieniu do bilansu wód podziemnych, dla których trudno określić obszar bilansowy na podstawie wyznaczenia działów wód podziemnych.

PROBLEM BADAWCZY

Ograniczenia, jakimi są obarczone wymienione grupy metod, sprawiają, że dane wejściowe do modeli określone za ich pomocą, cechują się dużą niepewnością. Błędne określenie danych wejściowych opisujących wymuszenia związane z górną powierzchnią brzegową powodują, że niezbędna jest ingerencja (niekiedy bardzo znacząca) w tablice danych wejściowych na etapie tarowania modelu. Wprowadzenie do obliczeń informacji błędnie charakteryzujących wielkość zasilania, jedynie w celu lepszego dopasowania stanów obliczonych do pomierzonych, prowadzi do zwiększenia precyzji obliczeń, jednak negatywnie odbija się na ich wiarygodności (Michalak i in., 2011).

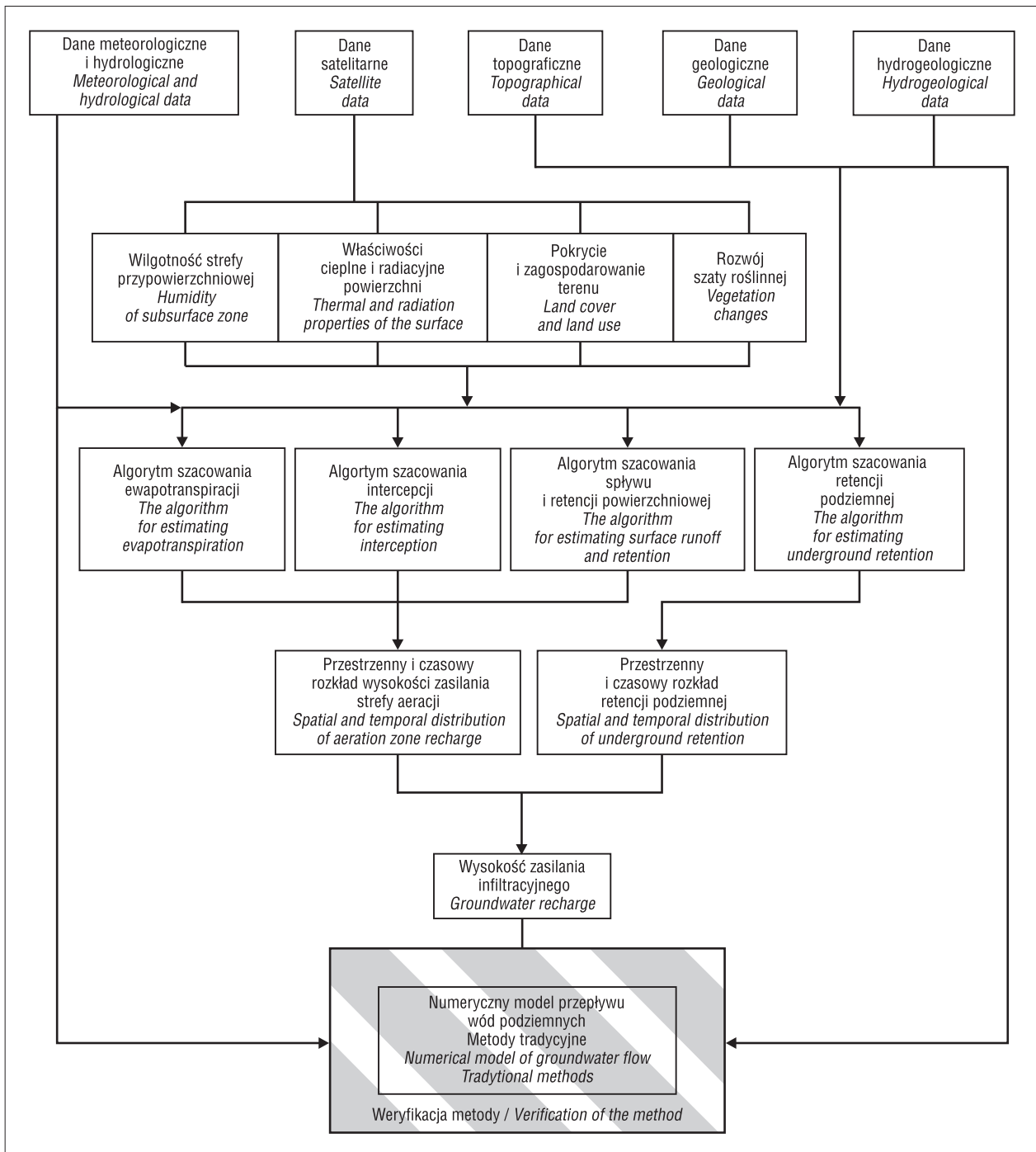
¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; danielzaszewski@student.uw.edu.pl.

Szansą na zwiększenie wiarygodności danych wejściowych, charakteryzujących zasilenie infiltracyjne, jest zastosowanie teledetekcji satelitarnej. Obserwacje satelitarne umożliwiają pozyskanie danych w różnych zakresach widma elektromagnetycznego. Relatywnie duża rozdzielczość przestrzenna i czasowa danych pozwala na prowadzenie kompleksowych badań w skali regionalnej. Informacje uzyskiwane z rejestratorów zamontowanych na pokładach satelitów są jednoznaczne, posiadają również formę przestrzenną, dlatego też nie zachodzi potrzeba stosowania metod interpolacyjnych lub ekstrapolacyjnych nieodzwonnych w przypadku danych punktowych pozyskanych z obserwacji naziemnych (Budzyńska i in., 2011). Uzasadnione było

więc podjęcie prac w celu opracowania metody identyfikacji wymuszeń związanych z górną powierzchnią brzegową na podstawie analizy obrazów satelitarnych oraz procedur z zakresu analizy przestrzennej.

KONCEPCJA METODY

Opracowana metoda opiera się na czterech algorytmach obliczeniowych, pozwalających na ilościową charakterystykę, głównych procesów decydująco wpływających na wielkość zasilania infiltracyjnego, do których zaliczono: ewapotranspirację, intercepcję, spływ oraz retencje powierzchniową i podziemną (ryc. 1).



Ryc. 1. Schemat metody wyznaczania wielkości zasilania infiltracyjnego z wykorzystaniem teledetekcji satelitarnej
Fig. 1. Diagram of method for determining groundwater recharge with the use satellite remote sensing

Podstawową grupą danych, wykorzystanych w opracowanej metodzie, są obrazy satelitarne, na których zarejestrowano promieniowanie elektromagnetyczne w wielu zakresach widma, w tym w podczerwieni termalnej i promieniowaniu mikrofalowym.

Dane satelitarne wzbogacone o obserwacje meteorologiczne pozwalają na wyznaczenie wartości jednego z podstawowych procesów kształtujących wielkość zasilania infiltracyjnego, jakim jest ewapotranspiracja, którego wielkość, wg Dębskiego (1970), może wynosić średnio nawet 70% całkowitej sumy opadów atmosferycznych.

Algorytm pozwalający na oszacowanie ewapotranspiracji bazuje na obrazach satelitarnych wykonanych w paśmie optycznym oraz podczerwieni termalnej, które można powiązać ze sobą przy pomocy uproszczonego równania bilansu cieplnego (Dąbrowska-Zielińska, 1995; Healy, 2010; Gibson i in., 2013):

$$R_n - G_0 - H - \lambda E = 0$$

gdzie:

R_n – promieniowanie netto (krótko- i długofalowe) [$W \cdot m^{-2}$],

G_0 – strumień ciepła glebowego [$W \cdot m^{-2}$],

H – strumień ciepła jawnego [$W \cdot m^{-2}$],

λE – strumień ciepła utajonego [$W \cdot m^{-2}$].

Równanie bilansu cieplnego opisuje wymianę energii między roślinami a otoczeniem. W równaniu ilość energii dostarczonej roślinom jest wykorzystywana na zamianę wody w parę wodną, na wytworzenie ciepła jawnego (przepływającego między roślinami i atmosferą) oraz na przepływ ciepła w glebie. Zdjęcia wykonywane w optycznym zakresie widma elektromagnetycznego są wykorzystywane do klasyfikacji pokrycia terenu, obliczenia wskaźników roślinnych oraz szacowania strumienia ciepła. Termogramy służą zaś do obliczania temperatury radiacyjnej powierzchni czynnej. Jej wartości, po dodaniu danych meteorologicznych, takich jak: temperatura powietrza, prędkość wiatru, ciśnienie atmosferyczne i wilgotność powietrza umożliwiają obliczenie gęstości strumienia ciepła jawnego H . Wyniki obliczeń H pozwalają na obliczenie wartości gęstości strumienia ciepła utajonego λE . Na podstawie uzyskanych wartości λE można obliczyć wielkość ewapotranspiracji rzeczywistej (Budzyńska i in., 2011).

Procedura obliczeniowa umożliwiająca oszacowanie intercepcji bazuje na podobnych parametrach i danych źródłowych, co informacje użyte do scharakteryzowania ewapotranspiracji. W tym przypadku jednak szczególny nacisk położono na określenie wskaźnika pokrycia liściowego (ang. *leaf area index*) LAI, który wyraża stosunek powierzchni liści do powierzchni gruntu (Dąbrowska-Zielińska, 1995). Dotychczasowe badania wykazały silne związki pomiędzy wartością LAI a wysokością intercepcji (Klamerus-Iwan, 2014). Obliczone wartości intercepcji odnoszą się do okresów chwilowych (w trakcie i po wystąpieniu opadów atmosferycznych). Oszacowanie wartości LAI przy użyciu danych satelitarnych i powiązanie go z wysokością i intensywnością opadów atmosferycznych oraz rodzajem zbiorowiska roślinnego pozwalają na wyznaczenie przestrzennego rozkładu wartości intercepcji. W przypadku niedysponowania dostatecznym zbiorem danych (np. brakiem informacji o charakterze opadu, niemożliwością określenia typu zbiorowiska roślinnego lub brakiem danych satelitarnych o odpowiedniej rozdzielczości czasowej), ilość

wody zużytej w procesie intercepcji może zostać uwzględniona poprzez włączenie jej do procesu ewapotranspiracji i wyznaczenie tzw. ewpotranspiracji potencjalnej.

Algorytm szacowania strat w ilości wody zasilającej system hydrogeologiczny, wynikających ze spływu powierzchniowego i retencji powierzchniowej, opiera się na analizie: morfologii terenu, jego pokrycia i zagospodarowania oraz budowy geologicznej strefy przypowierzchniowej, powiązanej z danymi pochodzącymi z obserwacji meteorologicznych. Źródłem danych o morfologii terenu w opracowanej metodzie jest numeryczny model terenu. Potencjał wystąpienia oraz intensywność obu tych zjawisk są tu traktowane jako wypadkowa nachylenia powierzchni terenu, obecności i typu pokrywy roślinnej, działalności człowieka oraz właściwości filtracyjnych skał, z których jest zbudowany dany obszar. Algorytm ten pozwala również na oszacowanie wielkości retencji śnieżnej na obszarze badań na podstawie danych meteorologicznych, charakteryzujących grubość pokrywy śnieżnej oraz materiałów satelitarnych, które umożliwiają określenie przestrzennego zasięgu jej występowania i tępa zanikania.

Na podstawie wymienionych algorytmów można określić ilość wód pochodzących z opadów atmosferycznych, docierających do strefy niepełnego nasycenia. W celu kompleksowej oceny wielkości zasilania systemu hydrogeologicznego niezbędne jest uwzględnienie zdolności strefy aeracji do gromadzenia wód wsiąkowych.

Procedury obliczeniowe, pozwalające na ilościową charakterystykę wielkości retencji wsiąkających wód opadowych w obrębie strefy aeracji, wymagają określenia właściwości skał, z których jest zbudowana strefa zdolna do gromadzenia i oddawania wody oraz – głębokości występowania zwierciadła wód podziemnych i jego wahań. Istotne jest tutaj również wydzielenie stref o niskiej retencji a więc obszarów, gdzie zwierciadło wód podziemnych zalega płytko pod powierzchnią terenu. Sytuacja taka jest charakterystyczna dla stref drenażu. Użytecznymi danymi do ich wyznaczania są satelitarne obrazy termalne. Uzyskane na ich podstawie informacje o temperaturze powierzchni pozwalają na określenie zasięgu stref drenażu wykorzystując zasadę, że obszary takie charakteryzują się niską amplitudą zmian temperatury (Sass i in., 2014). Inną drogą pozwalającą na identyfikację stref drenażu jest analiza uwilgotnienia powierzchniowych warstw skalnych, z zastosowaniem obrazów satelitarnych, wykonanych w mikrofalowym zakresie promieniowania (Gruszczńska & Dąbrowska-Zielińska, 1998), takich jak materiały pochodzące z misji ESA (European Space Agency) SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) czy SENTINEL 1.

Wymienione algorytmy obliczeniowe umożliwiają oszacowanie przestrzennych i czasowych rozkładów ilości wody zużytej w poszczególnych procesach kształtujących wielkość infiltracji. Wielkość zasilania infiltracyjnego systemu wodonośnego stanowi różnicę pomiędzy zbiorem danych opisujących przestrzenny rozkład zasilania strefy aeracji a wielkościami charakteryzującymi wielkość retencji podziemnej.

PLANOWANA PROCEDURA WERYFIKACJI METODY

Ocena zgodności wyników obliczeń wielkości zasilania infiltracyjnego, za pomocą opracowywanej metody ze stanem rzeczywistym, zostanie przeprowadzona przy użyciu badań modelowych. Dla rozpatrywanego systemu zostanie

stworzony numeryczny model przepływu wód podziemnych. Pozwoli to na określenie przestrzennego rozkładu funkcji stanu (rozkładu wysokości hydraulicznej) analizowanego systemu przy wprowadzonych wartościach wymuszeń, związanych z górną powierzchnią brzegową, oszacowanych proponowaną metodą. Dysponując pomiarami zwierciadła wód podziemnych charakteryzujących jego zmiany w cyklu rocznym, będzie możliwe dokonanie analizy reakcji modelu na zadane wymuszenia w odniesieniu do określonej empirycznie funkcji stanu. Taki sposób weryfikacji metody umożliwi określenie poprawności dopasowania oraz jego liczbową charakterystykę na podstawie różnic pomiędzy stanem pomierzonym a obliczonym. W planie badań przewiduje się również zastosowanie odrębnego sposobu weryfikacji opracowanej metody na podstawie klasycznych algorytmów szacowania zasilania systemu wodonośnego, np. metody Thornthwaite'a i Mathera (Wojciechowski, 1968), w wybranych punktach terenu badań.

Warunkiem poprawnej weryfikacji metody jest wybór odpowiedniego terenu badań. Z jednej strony wydzielony poligon badawczy powinien w możliwie najszerszy sposób ujmować procesy rządzące analizowanymi wymuszeniami, żeby najpełniej ocenić przydatność danych satelitarnych do ich oceny. Z drugiej strony musi być on na tyle dobrze rozpoznany, żeby zminimalizować oddziaływanie pozostałych czynników wpływających na wyniki badań modelowych, przede wszystkim heterogeniczności budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych. Pierwszy warunek zostanie spełniony w momencie, gdy analizy będą prowadzone w skali regionalnej, drugi zaś, gdy teren badań będzie posiadać bogatą dokumentację geologiczną i hydrogeologiczną oraz rozbudowaną sieć obserwacyjną parametrów meteorologicznych i hydrologicznych. Na terenie badań powinien występować również ciągły poziom wodonośny w strefie przypowierzchniowej. Jest to szczególnie istotne, gdyż wpływy wymuszeń związanych z górną powierzchnią brzegową są tu najbardziej czytelne.

Analiza dostępnych informacji geologicznych i hydrogeologicznych pozwoli na wydzielenie systemu wodonośnego do dalszych analiz, z szerszej przestrzeni hydrogeologicznej. Szczególną uwagę należy zwrócić na fakt, że wobec ograniczonej dostępności i nierównomiernego rozkładu punktów, z których są czerpane informacje o właściwościach modelowanego systemu, stopień rozpoznania jego niejednorodności ma zawsze charakter dyskretny (Małecki i in., 2006). Dane punktowe pochodzące z profili wiertniczych, ujęć wód podziemnych i otworów obserwacyjnych powinny zostać poddane przetworzeniu przy pomocy metod geostatystycznych, celem predykcji położenia powierzchni stropowych i spągowych poszczególnych warstw skalnych oraz rozkładu wartości parametrów charakteryzujących właściwości hydrodynamiczne systemu (Gruszczyński & Małecki, 2010). Dane archiwalne powinny zostać wzbogacone o obserwacje terenowe oraz o analizy laboratoryjne zgromadzonych próbek skał pobranych ze strefy przypowierzchniowej celem wyznaczenia współczynnika filtracji, wodochłonności i odsączalności, wydzielonych klas litogenetycznych utworów przypowierzchniowych. Pomiary terenowe muszą obejmować również obserwacje położenia zwierciadła wód podziemnych w otworach studziennych i piezometrach w ustalonym interwale czasowym.

Jako poligon badawczy spełniający wskazane powyżej kryteria uznano fragment sandru kurpiowskiego. Obecnie

trwają prace mające na celu rozpoznanie geologiczne i hydrogeologiczne terenu badań. Jest również prowadzony monitoring stanów zwierciadła wód podziemnych pierwszego poziomu wodonośnego oraz pobór i analiza laboratoryjna próbek skał ze strefy przypowierzchniowej. Jednocześnie jest dokonywana akwizycja i przetwarzanie danych satelitarnych.

PODSUMOWANIE

Modele przepływu wód podziemnych są obecnie podstawowymi narzędziami służącymi do analizy środowiska hydrogeologicznego. Istnieje jednak istotna niepewność danych wykorzystywanych w konstrukcji tablic wejściowych do modeli. Elementami obciążonymi dużymi nieścisłościami są dane charakteryzujące wymuszenia związane z górną powierzchnią brzegową systemu wodonośnego. Na wskazane wymuszenia składają się przede wszystkim procesy związane z kształtowaniem wielkości zasilania wód podziemnych przez infiltrację opadów atmosferycznych, takie jak: parowanie terenowe, intercepcja czy retencja powierzchniowa i podziemna. Użycie tradycyjnych metod szacowania zasilania infiltracyjnego wiąże się z poważnymi ograniczeniami zwłaszcza przy analizie systemów w skali regionalnej. Rozwój nowoczesnych technik teledetekcyjnych oraz rosnąca liczba satelitów dokonujących zobrażeń, z coraz lepszą rozdzielczością przestrzenną i czasową, niesie ze sobą możliwość dokładniejszego oszacowania parametrów charakteryzujących infiltrację. Użycie danych satelitarnych sprzężonych z informacjami pochodzącymi z naziemnych stacji meteorologicznych oraz rozpoznaniem geologicznym i hydrogeologicznym pozwoliło na opracowanie metody, która w sposób kompleksowy i przestrzennie charakteryzuje wielkość zasilania systemu wodonośnego. Proponowana metoda wykorzystuje cztery algorytmy obliczeniowe pozwalające na ilościową charakterystykę głównych procesów decydująco wpływających na wielkość zasilania infiltracyjnego, do których zaliczono: ewapotranspirację, intercepcję, spływ oraz retencję powierzchniową i podziemną. Wszystkie algorytmy wykorzystują obrazy satelitarne w wielu zakresach spektrum promieniowania elektromagnetycznego.

Opracowana metoda poddana zostanie procesowi weryfikacji. Podstawowym narzędziem weryfikacyjnym będzie numeryczny model przepływu wód podziemnych obejmujący rozpatrywany system wodonośny. Określenie dokładności i wiarygodności opracowanej metody nastąpi poprzez analizę reakcji modelu na zadane wymuszenia, w odniesieniu do wyznaczonej empirycznie funkcji stanu. Ocena poprawności dopasowania, oraz jego liczbowa charakterystyka zostanie określona na podstawie różnic pomiędzy pomierzonym a obliczonym stanem systemu. Dodatkowym elementem weryfikującym metodę będzie oszacowanie wielkości zasilania systemu wodonośnego za pomocą klasycznych algorytmów obliczeniowych w wybranych punktach terenu badań.

Niniejszy artykuł przedstawia wstępne założenia przygotowywanej przez autora rozprawy doktorskiej zatytułowanej „Identyfikacja wymuszeń związanych z górną powierzchnią brzegową systemów wodonośnych na podstawie analizy obrazów satelitarnych”. Praca powstaje pod kierunkiem naukowym prof. dr. hab. Jerzego J. Małeckiego i dr. Tomasza Gruszczyńskiego, którym autor dziękuje za pomoc i konsultacje.

LITERATURA

- BUDZYŃSKA M., DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA K., TURLEJ K., MAŁEK I. & BARTOLD M. 2011 – Monitoring przyrodniczy Bagien Biebrzańskich z zastosowaniem teledetekcji. Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie, 11 (3): 39–64.
- BYCZKOWSKI A. 1999 – Hydrologia, T. 2, Wyd. SGGW, Warszawa.
- DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA K. 1995 – Szacowanie ewapotranspiracji wilgotności gleb i masy zielonej łąk na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA. Wyd. Continuo, Wrocław.
- DEBSKI K. 1970 – Hydrologia. Wyd. Arkady, Warszawa.
- DUDA R., WITCZAK S. & ŻUREK A. 2011 – Mapa wrażliwości wód podziemnych Polski na zanieczyszczenie. 1 : 500 000. Metodyka i objaśnienia tekstowe. Wyd. AGH, Kraków.
- GIBSON L.A., JARMAIN C., SU Z. & ECKARDT F.E. 2013 – Estimating evapotranspiration using remote sensing and the Surface Energy Balance System – A South African perspective. Water SA, 39 (4): 477–484.
- GRUSZCZYŃSKA M. & DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA K. 1998 – Application of microwave images from European Remote Sensing Satellites (ERS-1/2) for soil moisture estimates. J. Water Land Dev., 2: 7–18.
- GRUSZCZYŃSKI T. & MAŁECKI J.J. 2010 – Identyfikacja systemu krążenia wód w artezyjskim poziomie wodonośnym na obszarze zlewni Krynki (Wysoczyzna Białostocka) na podstawie regionalnego modelu pola filtracji. Biul. Państw. Inst. Geol., 442: 49–60.
- HEALY R.W. 2010 – Estimating groundwater recharge. Cambridge Univ. Press.
- KLAMERUS-IWAN A. 2014 – Różne spojrzenia na proces intercepcji drzew i jego determinanty. Leśne Pr. Bad., 75 (3): 291–300.
- MACIOSZCZYK T. 1999 – Matematyczne podstawy opisu ruchu i migracji wód podziemnych dla modelowania i sterowania ich zasobami. Biul. Państw. Inst. Geol., 338: 157–178.
- MAŁECKI J.J., NAWALANY M., WITCZAK S. & GRUSZCZYŃSKI T. 2006 – Wyznaczenie parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodku porowatym dla potrzeb badań hydrogeologicznych i ochrony środowiska. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- MICHAŁAK J., NAWALANY M. & SADURSKI A. (red.) 2011 – Schematyzacja warunków hydrogeologicznych na potrzeby numerycznego modelowania przepływu w JCWPd. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PAZDRO Z. & KÓZERSKI B. 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- SASS G.Z., CREED I.F., RIDDELL J. & BAYLEY S.E. 2014 – Regional-scale mapping of groundwater discharge zones using thermal satellite imagery. Hydrological Processes, 28: 5662–5673.
- SCANLON B.R., HEALY R.W. & COOK P.G. 2002 – Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeol. J., 10: 18–39.
- SOCZYŃSKA U. (red.) 1989 – Procesy Hydrologiczne. PWN, Warszawa.
- SZYMANKO J. 1980 – Koncepcje systemu wodonośnego i metod jego modelowania. Wyd. Geol., Warszawa.
- WOJCIECHOWSKI K. 1968 – Zagadnienie metody bilansu wodnego Thornthwaite’a i Mathera w zastosowaniu do Polski. PWN, Warszawa.