

Ireneusz Kajewski

**METODYKA OPRACOWANIA MAP PODATNOŚCI
WÓD PODZIEMNYCH NA ZANIECZYSZCZENIE
PRZEZ PESTYCYDY ORGANICZNE**

***METHOD OF MAPPING GROUNDWATER VULNERABILITY
TO POLLUTION BY ORGANIC PESTICIDES***

Streszczenie

Do opracowania mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne może być wykorzystany system oparty na liczbowych indeksach AF, zaproponowany przez Rao i wsp. [1985]. Indeks AF uwzględnia zjawiska adwekcji, sorpcji oraz rozkładu pestycydu zachodzące w czasie jego migracji przez strefę aeracji. Zastosowanie indeksu AF na określonym obszarze wymaga zebrania danych dotyczących miąższości strefy aeracji, natężenia infiltracji efektywnej oraz danych glebowych, obejmujących gęstość objętościową i zawartość węgla organicznego, a ponadto danych dotyczących właściwości pestycydów (współczynnik sorpcji i czas połowicznego rozkładu). Najbardziej efektywną metodą analizy danych przestrzennych prowadzącą do opracowania przestrzennego rozkładu indeksu AF na analizowanym obszarze są systemy GIS.

Nakreślona w niniejszej pracy koncepcja mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne wymaga opracowania dwóch map numerycznych (rastrowych) przedstawiających dla określonego obszaru przestrzenną zmienność parametrów A i B, określonych parą równań (8), na podstawie których użytkownik systemu komputerowego, wykorzystując wzór (10) może w środowisku GIS samodzielnie utworzyć i wydrukować mapę podatności dla wybranego przez siebie konkretnego pestycydu.

Słowa kluczowe: wody podziemne, podatność na zanieczyszczenie, pestycydy organiczne, GIS

Summary

Maps of groundwater vulnerability to pollution by organic pesticides can be elaborated using Attenuation Factor (AF) approach, evaluated by Rao et al. in 1985. AF concept takes into account such transport phenomena as: advection, sorption and, biodegradation. AF model requires data on hydrogeology, groundwater recharge, soil environment properties (dry bulk density and organic carbon content) as well as pesticide properties as half-life decay and sorption coefficient of pesticide by organic matter.

Nowadays GIS environment is the most suitable tool for mapping groundwater vulnerability to pollution according to AF approach. The presented concept consists on modification of original Rao's concept (equation 7) to the form given by equation 10. Firstly two numerical maps (grids) for spatial distribution of parameters A and B (according to equation (8)) have to be created and next any individual user will be able to create the vulnerability map on his own for given pesticide.

Visualizations (maps) of groundwater vulnerability to pollution by organic pesticides should be used as supplementary tools by farmers and extension services, local water and environmental authorities as well as by legislative bodies.

Key words: *groundwater, vulnerability to pollution, organic pesticides, GIS based modelling*

WPROWADZENIE

Podatność wód podziemnych na zanieczyszczenie jest właściwością systemu hydrogeologicznego charakteryzującą możliwość przemieszczenia się substancji zanieczyszczającej z powierzchni terenu do określonego systemu wodonośnego. Podatność wód podziemnych na zanieczyszczenie określa stopień ryzyka negatywnego oddziaływania czynników antropogenicznych na jakość wód podziemnych w określonych warunkach naturalnych. Oprócz czynników naturalnych o podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie decydują w dużym stopniu również właściwości substancji zanieczyszczającej oraz jej ładunek. Tak określoną podatność określa się mianem **podatności specyficznej** lub **podatności zintegrowanej** [Krogulec 2004].

Problematyka oceny podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie określonego obszaru najczęściej sprowadza się do sporządzenia mapy lub map podatności. Mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie są wykorzystywane jako element wspomagający podejmowanie decyzji w zakresie: planowania przestrzennego (zmiany użytkowania powierzchni terenu), podejmowania decyzji w zakresie działań związanych z ochroną Użytkowych Zbiorników Wód Podziemnych, planowania lokalizacji sieci monitoringu jakości wód podziemnych.

KONCEPCJA OPRAWOWANIA MAPY WRAŻLIWOŚCI

Specyficzne właściwości pestycydów organicznych powodują, że mechanizm ich przemieszczania się przez strefę aeracji jest znacznie bardziej skomplikowany niż zanieczyszczeń konserwatywnych. W procesie transportu pestycydów organicznych niezmiernie istotną rolę odgrywa opóźnienie ich ruchu w stosunku do przepływu wody związane z sorpcją (przede wszystkim przez substancję organiczną zawartą w glebie) oraz zachodzące w trakcie migracji przez strefę aeracji reakcje rozkładu. Generalnie należy stwierdzić, że im podatność pestycydu na sorpcję jest mniejsza oraz im bardziej jest on odporny na degradację, tym większa jest możliwość jego dotarcia do zwierciadła wód podziemnych. Właściwości migracyjne pestycydów organicznych w decydującej mierze są uzależnione od ich struktury chemicznej, co powoduje, że w takich samych warunkach środowiskowych niektóre substancje mogą stanowić istotne zagrożenie dla wód podziemnych, podczas gdy inne można uznać za znacznie bardziej „bezpieczne”.

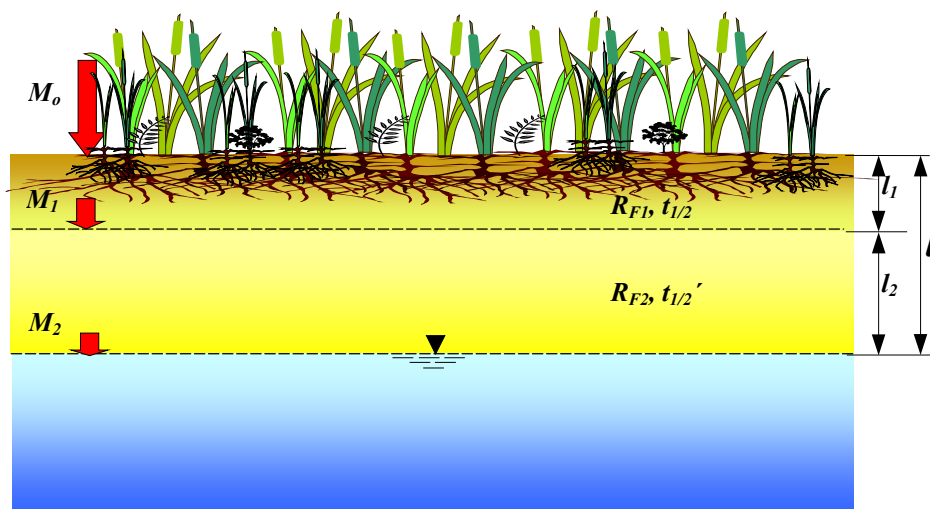
Scharakteryzowane uwarunkowania powodują, że nie jest możliwe opracowanie dla określonego obszaru jednej mapy wrażliwości wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne. Realizacja zadania oceny podatności wód gruntowych na zanieczyszczenie przez pestycydy winna się zatem sprowadzać do opracowania oraz zaprezentowania wielu map podatności – dla różnych pestycydów.

Tradycyjne ujęcie kartograficznego przedstawienia podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie, poprzez udostępnienie wielkiej ilości (katalog lub atlas) map wydrukowanych na papierze byłoby podejściem nieracjonalnym i ekonomicznie nieuzasadnionym. Możliwości, jakie dają obecnie wysoko wydajne systemy komputerowe oraz wyspecjalizowane narzędzia analizy danych przestrzennych w rodzaju GIS sprawiają, że mapa podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy mogłaby stanowić wyłącznie opracowanie funkcjonujące w sieci komputerowej zainteresowanej instytucji bądź w komputerze indywidualnego użytkownika, a nawet w Internecie.

Zaprezentowany niżej system oceny podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne umożliwia samodzielne utworzenie w środowisku GIS mapy podatności dla dowolnego pestycydu przez każdego potencjalnego użytkownika systemu.

CHARAKTERYSTYKA INDEKSU AF (*ATTENUATION FACTOR*)

Rao i współpracownicy zaproponowali w 1985 r. oparty na przesłankach hydrodynamicznych model oceny podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy w postaci indeksu AF [Rao i in. 1985]. Model AF uwzględnia w swej strukturze zarówno zjawisko transportu adwekcyjnego, jak również sorpcję pestycydów przez stałą fazę gleby oraz ich rozkład podczas migracji przez strefę aeracji.



Rysunek 1. Schemat ideowy przemieszczania się pestycydów przez strefę aeracji i koncepcja indeksu AF

Figure 1. Movement of pesticides through unsaturated zone and Attenuation Factor (AF) concept

$$AF = \frac{M_2}{M_0} \exp(-\lambda t_r) \quad (1)$$

gdzie:

- M_2 – masa pestycydu, która po przesączeniu się przez strefę aeracji dociera do powierzchni zwierciadła wód podziemnych [M];
- M_0 – masa pestycydu, która po wykonaniu zabiegu oprysku trafia na powierzchnię gleby, [M];
- t_r – czas przemieszczania się pestycydu przez strefę aeracji [T];
- λ – współczynnik rozkładu pestycydu w środowisku glebowym (T^{-1}) według reakcji rozkładu I rzędu, którego wartość może zostać obliczona, gdy znany jest czas połowicznego rozkładu pestycydu w glebie ($t_{1/2}$) [T] ze wzoru:

$$\lambda = \frac{0,693}{t_{1/2}} \quad (2)$$

Czas przemieszczania się pestycydu (t_r) przez strefę aeracji (l) wyliczymy ze wzoru:

$$t_r = \frac{l}{v_p} \quad (3)$$

w którym v_p [$L \cdot T^{-1}$] oznacza prędkość przemieszczania się pestycydu w ośrodku porowym strefy aeracji:

$$v_p = \frac{v}{R_F} \quad (4)$$

gdzie:

- v – średnia prędkość przesączania się wody w strefie aeracji [$L \cdot T^{-1}$];
- R_F – bezwymiarowy współczynnik opóźnienia (*retardation factor*), charakteryzujący efekt zjawiska sorpcji substancji w ośrodku porowym.

Średnia prędkość przepływu wody w ośrodku nienasyconym (strefie) aeracji może zostać obliczona, gdy znana jest wartość natężenia infiltracji efektywnej (q , [$L \cdot T^{-1}$]) oraz połowej pojemności wodnej ośrodka (Θ_{FC} , [$L^3 \cdot L^{-3}$]) ze wzoru:

$$v = \frac{q}{\Theta_{FC}} \quad (5)$$

Współczynnik opóźnienia, wynikający z sorpcji pestycydu przez materię organiczną wg izotermy liniowej (Henry'ego) dla pestycydów charakteryzujących się niewielką lotnością (zdolnością do parowania z roztworu wodnego) można obliczyć, stosując wyrażenie:

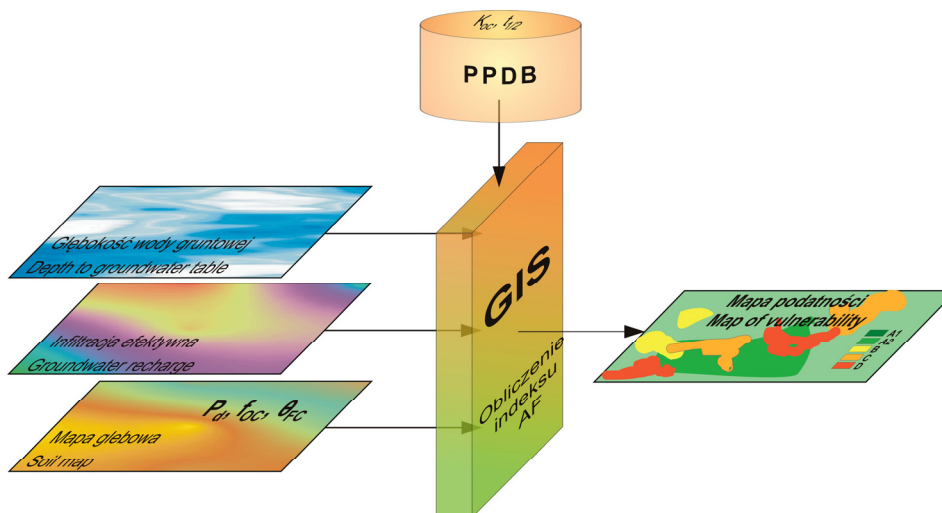
$$R_F = 1 + \frac{\rho_d \cdot f_{oc} \cdot K_{oc}}{FC} \quad (6)$$

gdzie:

- ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [$M \cdot L^{-3}$];
- f_{oc} – zawartość węgla organicznego w glebie [$M \cdot M^{-1}$];
- K_{oc} – współczynnik sorpcji pestycydu przez węgiel organiczny [$L^3 \cdot M^{-1}$];
- Ostatecznie wartość indeksu AF, przy uwzględnieniu wyrażeń 2–6 przybierze postać:

$$AF = \exp\left(-\frac{0,693 \cdot l \cdot R_F \cdot \Theta_{FC}}{q \cdot t_{1/2}}\right) \quad (7)$$

Schemat ideowy opracowania mapy podatności wód gruntowych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne przy wykorzystaniu systemu GIS przedstawia rysunek 2, na którym dane dotyczące parametrów glebowych przedstawiono w postaci jednej mapy, lecz równie dobrze mogłyby być to trzy oddzielne mapy. W takim przypadku mapy te muszą zawierać dane dotyczące: gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (ρ_d), połowej pojemności wodnej (Θ_{FC}) oraz zawartości węgla organicznego (f_{oc}).



Rysunek 2. Opracowanie mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne na podstawie indeksu AF (na podstawie równania 8).

PPDB: Baza Danych Właściwości Pestycydów

Figure 2. GIS based mapping of groundwater vulnerability to pollution by organic pesticides according to equation 8. PPDB: Pesticide Properties Data Base

Bez wątpienia opracowanie mapy podatności według schematu przedstawionego na rysunku 2 musi zostać powierzone osobie (lub zespołowi), która oprócz posiadania niezbędnej wiedzy i umiejętności w zakresie obsługi GIS będzie ponadto dysponowała odpowiednimi mapami numerycznymi oraz innymi niezbędnymi danymi źródłowymi. Tak scharakteryzowany „ekspert” musi posiadać również niezbędną wiedzę, umiejętności i doświadczenie w zakresie oceny i interpretacji danych dotyczących warunków glebowych i hydrogeologicznych oraz czynników meteorologicznych.

Wartość indeksu AF w określonym miejscu należy interpretować jako iloraz ilości pestycydu jaka po przemieszczeniu się przez strefę aeracji dociera do zwierciadła wody podziemnej oraz ilości pestycydu, jaka po zastosowaniu zabiegów agrochemicznych trafia na powierzchnię gleby (wzór 1 w związku z rysunkiem 1). Wartość indeksu AF zawiera się w granicach od 0 do 1, im wartość indeksu jest wyższa, tym wyższa jest podatność warstwy wodonośnej na zanieczyszczenie przez pestycydy. W tabeli 1 podano propozycję pięciu kategorii zagrożenia jakości wód podziemnych ze względu na wartość indeksu AF [Khan, Liang 1989].

Tabela 1. Klasy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie wg indeksu AF [Khana & Liang 1989]

Table 1. Categories of groundwater pollution potential according to AF index value

Indeks AF	<0,0001	0,0001–0,01	0,01–0,1	0,1–0,25	0,25–1,0
Podatność Vulnerability	bardzo niska very low	niska low	średnia medium	wysoka high	bardzo wysoka very high

Od czasu opublikowania pracy przez Rao i współpracowników, indeks AF był wielokrotnie stosowany do regionalnych ocen podatności płytkich wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne [Khan, Liang 1989; Riparbelli i in. 1996; Kajewski 2005].

W rozwiązaniu Rao i współautorów długości drogi przesączania się pestycydu do zwierciadła wody podziemnej niezbędną do obliczenia indeksu AF przyjęto jako równą całkowitej miąższości strefy aeracji (rys. 1). Oznacza to, że na całej długości tej drogi zakłada się stałą wartość współczynnika opóźnienia R_F , a także stałe warunki degradacji pestycydu ($t_{1/2}$). Jak wiadomo zawartość substancji organicznej a zatem również zawartość węgla organicznego, decydującego w dużym stopniu o wartości współczynnika opóźnienia jest najwyższa w górnej strefie profilu gruntowego – glebie. Podobnie jest odnośnie biologicznego rozkładu pestycydów w środowisku gruntowym – najkorzystniejsze warunki (z uwagi na obecność mikroorganizmów, warunki termiczne, dostępność substancji pokarmowych i inne) panują w glebie. Z tego względu należy stwierdzić, że wartość współczynnika opóźnienia jest zdecydowanie wyższa w glebie (strefa l_1 , rys. 1) niż w głębszych warstwach profilu gruntowego (strefa l_2). Zastosowanie do obliczenia wartości indeksu AF długości drogi migracji równej całkowitej miąższości strefy aeracji, w której zdolności sorpcyjne ośrodka, jak i warunki rozkładu pestycydów są stałe (takie jak w glebie) powoduje z całą pewnością zaniżenie wartości indeksu AF. Wydaje się zdecydowanie bardziej uzasadnione ograniczenie obliczenia indeksu AF jedynie do biologicznie aktywnej części strefy aeracji, tj. do gleby (l_1). Przyjmując, że w dolnej części strefy aeracji (l_2), z uwagi na znikomą zawartość substancji organicznej (poza stosunkowo rzadką sytuacją, gdy strefa ta lub jej część jest wytworzona z utworów organicznych) nie zachodzi zjawisko sorpcji oraz ze względu na brak mikroorganizmów można pominąć zjawiska rozkładu pestycydów, to ilość pestycydów, jaka dotrze do powierzchni zwierciadła wód podziemnych (M_2) będzie równa ilości przenikającej przez glebę (M_1).

Z punktu widzenia oceny ryzyka zanieczyszczenia wód podziemnych przez pestycydy organiczne przedstawiona wyżej modyfikacja sposobu obliczenia indeksu AF jest korzystna, bowiem w niewielkim stopniu zawyża wartość indeksu w porównaniu z rzeczywistymi warunkami migracji w środowisku glebowo-gruntowym.

METODYKA OPRACOWANIA MAP WRAŻLIWOŚCI

Jeżeli w równaniach (6 i 7) zastosujemy podstawienia:

$$A = \frac{0,693 I_{FC}}{q} \quad \text{oraz} \quad B = \frac{d \cdot f_{oc}}{FC} \quad (8)$$

to współczynnik opóźnienia według równania (6) będzie równy:

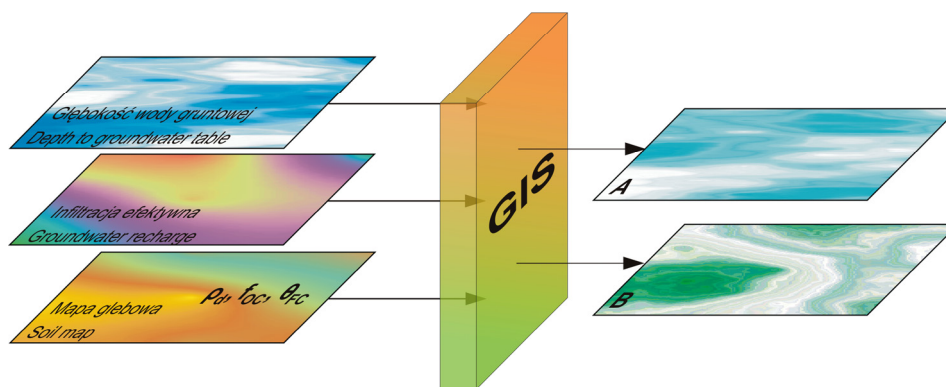
$$R_F = I + B \cdot K_{oc}, \quad (9)$$

natomiast wyrażenie określające indeks AF przybierze postać:

$$AF = \exp \frac{A + 1 + B \cdot K_{oc}}{t_{1/2}} \quad (10)$$

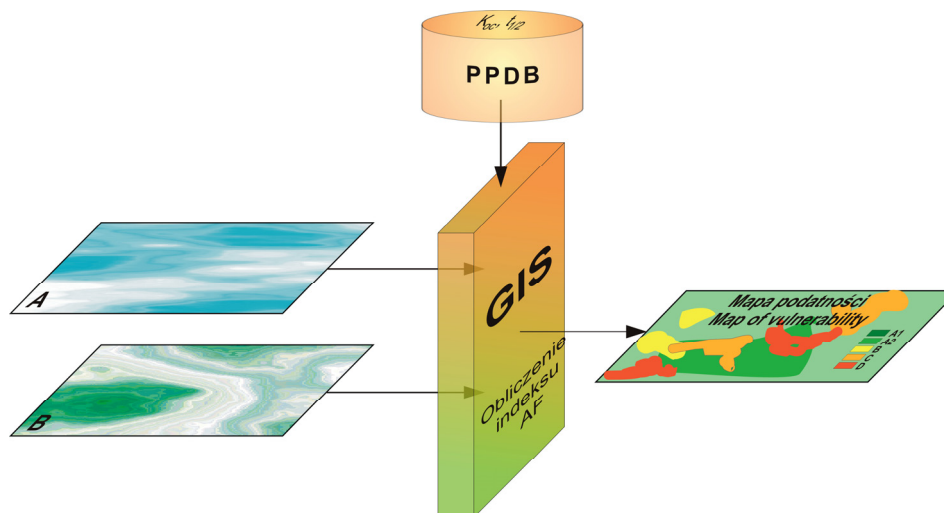
Parametry A i B w równaniach (8–10) są wielkościami mianowanymi (A [T]; B [M·L⁻³]), jednak nie należy im przypisywać określonej interpretacji fizycznej – zostały wprowadzone wyłącznie ze względów „technicznych”, dla uproszczenia sposobu opracowania mapy podatności.

Wykorzystując środowisko GIS, wystarczy zatem przygotować dwie mapy rastrowe (grid) przedstawiające dla określonego obszaru przestrzenny rozkład parametrów A oraz B (rys. 3), aby na ich podstawie, stosując wyrażenie (10) otrzymać mapę wrażliwości wód podziemnych na zanieczyszczenie przez dowolny pestycyd organiczny, określony przez współczynniki K_{oc} oraz $t_{1/2}$ (rys. 4).



Rysunek 3. Opracowanie mapy przestrzennego zróżnicowania parametrów A i B wg wzorów (8)

Figure 3. GIS based mapping of parameters A and B, according to equation 8



Rysunek 4. Opracowanie mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne w środowisku GIS na podstawie wzoru 10
Figure 4. GIS based mapping of groundwater vulnerability to pollution by organic pesticides according to equation 10

Numeryczne mapy przestrzennego rozkładu parametrów A i B na określonym obszarze powinny zostać przygotowane przez specjalistów (ekspertów) na drodze analizy właściwych danych charakteryzujących warunki glebowe oraz głębokość położenia zwierciadła wody podziemnej i natężenie infiltracji efektywnej.

Ostateczne mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez konkretne pestycydy mogą być tworzone w prosty i szybki sposób przez dowolnego użytkownika systemu (rys. 4), który musi dysponować jedynie elementarną wiedzą w zakresie analizy danych przestrzennych w systemach GIS oraz bazą danych na temat właściwości pestycydów, zawierającą liczbowe wartości parametrów K_{oc} oraz $t_{1/2}$.

Obecnie najpełniejsze i najbardziej kompetentne źródło danych na temat różnorodnych właściwości pestycydów, w tym cech fizycznych, parametrów migracyjnych oraz danych toksykologicznych stanowi wielojęzyczna, ogólnie dostępna baza danych utworzona w ramach projektu FOOTPRINT, realizowanego w ramach 6 Programu Ramowego Unii Europejskiej [Footprint PPDB 2007]. Baza danych Footprint PPDB zawiera dane dla ponad 600 substancji biologicznie czynnych, w tym 523 pestycydów organicznych. Substancje te, należące do bardzo różnych grup związków chemicznych, charakteryzują się niezmiernie zróżnicowanymi właściwościami migracyjnymi. Zakres zmienności

K_{oc} zawiera się w granicach 1–2184750 ml·g⁻¹, natomiast wartość czasu połowicznego rozkładu $t_{1/2}$ zawiera się w zakresie 0,1–6200 dób.

Konieczne podkreślenia wydaje się, że użytkownik systemu oceny podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne według schematu przedstawionego na rysunku 4 nie jest obciążony koniecznością pozyskiwania (zakupu) danych źródłowych.

PODSUMOWANIE

We współczesnym rolnictwie na masową skalę stosowane są pestycydy organiczne, stanowiące w licznych przypadkach źródło zagrożenia, a niekiedy także źródło zanieczyszczenia wód podziemnych. Podatność płytkich wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne zależy zarówno od właściwości pestycydów, wynikających z ich budowy chemicznej, właściwości środowiska glebowego oraz natężenia infiltracji efektywnej. Wygodnym ilościowym parametrem charakteryzującym podatność wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne jest indeks AF.

Pestycydy stanowią ogromną grupę substancji organicznych, różniących się strukturą chemiczną i wynikającymi stąd różnymi parametrami migracyjnymi, z których najważniejszymi są współczynnik sorpcji przez węgiel organiczny (K_{oc}) i czas połowicznego rozkładu w środowisku glebowym ($t_{1/2}$). Wielka różnorodność pestycydów w zakresie wartości parametrów migracyjnych powoduje, że podatność na zanieczyszczenie wód podziemnych na określonym obszarze będzie różna w zależności od rozpatrywanego związku chemicznego. Wszechstronna ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne wymagałaby zatem opracowania i udostępnienia katalogu lub atlasu map papierowych, które na poszczególnych planszach przedstawiałyby podatność na zanieczyszczenie przez konkretne substancje chemiczne. Takie rozwiązanie zadania, głównie z uwagi na koszty, z całą pewnością nie byłoby rozwiązaniem racjonalnym, również analiza wielkiej ilości map byłaby stosunkowo uciążliwa.

Nakreślona w niniejszej pracy koncepcja mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne wymaga opracowania dwóch map numerycznych (rastrowych) przedstawiających dla określonego obszaru przestrzenną zmienność parametrów A i B, określonych parą równań (8), na podstawie których użytkownik systemu komputerowego, wykorzystując równanie (10), może w środowisku GIS samodzielnie utworzyć i wydrukować mapę podatności dla wybranego przez siebie konkretnego pestycydu.

Metodyka opracowywania takich map nakreślona w niniejszej pracy sprawia, że proces wykonania mapy dla konkretnego pestycydu organicznego jest niezmiernie szybki i nieskomplikowany.

Mapy podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy organiczne mogą stanowić istotne narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji w zakresie zagospodarowania przestrzennego (zmian sposobu użytkowania terenu) oraz ustanawiania stref i obszarów ochronnych ujęć oraz użytkowych zbiorników wód podziemnych. Innym obszarem wykorzystania tego rodzaju map będą zadania w zakresie planowania zabiegów ochrony roślin uprawnych podejmowane przez ośrodki doradztwa rolniczego, czy też samych rolników. Wydaje się, że ten ostatni obszar potencjalnego wykorzystania map podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy powinien być uznany w najbliższej przyszłości jako najważniejszy.

BIBLIOGRAFIA

- Footprint PPDB (Pesticide Properties Database) <http://www.herts.ac.uk/aeru/footprint>, 2007.
- Kajewski I. *Ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie przez pestycydy w skali regionalnej przy zastosowaniu GIS*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu Nr 520. Inżynieria Środowiska XIV, 2005, s. 55–69.
- Khan M. A., Liang T. *Mapping pesticide contamination potential*. Environmental Management 13 (2); 1989, s. 233–242.
- Krogulec E.. *Ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie w dolinie rzecznej na podstawie przesłanek hydrodynamicznych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego. Warszawa 2004, s. 177.
- Rao P. S. C., Hornsby A. G., Jessup R. E. *Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater*. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings 44, 1985, s. 1–8.
- Riparbelli C., Ferioli A., Azimonti G., Regidore C., Battipede G., Maroni M. *Impact of pesticides to groundwater resources in an alluvial plain using a Geographical Information System*. Central European Journal of Public Health, 1, 4: 1996, s. 21–24.

Dr inż. Ireneusz Kajewski
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Instytut Inżynierii Środowiska
pl. Grunwaldzki 24, 50–363 Wrocław
tel. 071 320–55–59
kajewski@up.wroc.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. Jerzy Kowalski*