

OCENA ZMIENNOŚCI POZIOMU WÓD GRUNTOWYCH Z ZASTOSOWANIEM GRADIENTOWEGO POLA WEKTOROWEGO

Edyta Nowicka¹, Beata Olszewska¹, Katarzyna Kopańczyk², Halina Klimczak²,
Leszek Pływaczyk¹

¹ Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, e-mail: edyta.nowicka@up.wroc.pl; beata.olszewska@up.wroc.pl; leszek.plywaczyk@up.wroc.pl

² Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, e-mail: katarzyna.kopanczyk@up.wroc.pl; halina.klimczak@up.wroc.pl

STRESZCZENIE

Oddanie do eksploatacji w 1958 r. stopnia wodnego na Odrze w Brzegu Dolnym oraz przedłużająca się budowa kolejnego stopnia w Malczycach wpłynęło na zmianę stosunków wodnych w przyległej dolinie. Poniżej Brzegu Dolnego dno Odry ulega silnym procesom erozji miejscowej i liniowej. Powoduje to systematyczne obniżanie się stanów wody w rzece i głębokości zalegania wód gruntowych w przyległych terenach. W pracy przedstawiono metodykę badania zmienności poziomu wód gruntowych z wykorzystaniem gradientowego pola wektorowego. Analizy przeprowadzono dla danych pochodzących z dwóch lat hydrologicznych – 1976 i 2012. Gradient, określający intensywność (spadek) poziomu wód gruntowych, został wyznaczony w przyjętych polach odniesienia, opracowanych zgodnie z systemem „Temkart”, o wymiarze 500 × 500 m. Otrzymane wartości gradientu były podstawą do analizy wielkości i kierunku zmian poziomu wód (graficzna prezentacja wektorów), które pozwalają na określenie tempa zmian poziomu wód gruntowych. Uzyskane wyniki analiz w przyjętym okresie, z zastosowaniem zaproponowanej metodyki, wskazują na zróżnicowane zmiany poziomu wód gruntowych na badanym obszarze.

Słowa kluczowe: wody gruntowe, dolina Odry, gradient wód gruntowych

EVALUATION OF VARIABILITY OF GROUNDWATER LEVEL USING THE GRADIENT VECTOR FIELD

ABSTRACT

Commissioning to operate in 1958 the dam on the Odra river in Brzeg Dolny and prolonged build another stage in Malczyce resulted in a change of water conditions in the adjacent valley. Below the Brzeg Dolny the bottom of the Odra river is a strong erosion local and linear. This results in a systematic lowering of water levels in the river and the depth of the groundwater in adjacent areas. The paper presents a methodology for the study of variation in groundwater levels using a gradient vector field. Analyses were carried out for data from two hydrological years – 1976 and 2012. Gradient, specifying the intensity (decrease) in the groundwater level was set in the fields of reference adopted, developed in accordance with the system „Temkart” size of 500 × 500 m. Gradient values obtained were the basis

for the analysis of the size and direction of changes in water level (graphical presentation of the vectors), which are used to determine the rate of changes in groundwater levels. The results of the analysis in the given period, using the proposed methodology, indicate distinct changes in the level of groundwater in the study area.

Keywords: groundwater, Odra valley, groundwater gradient.

WSTĘP

Ocenia się, że ponad 90% zasobów wód słodkich na kuli ziemskiej stanowią zasoby wód gruntowych i podziemnych (nie wliczając wody zmagazynowanej w lodowcach). Wody gruntowe znajdujące się na głębokości mniejszej od 1,5 m pod powierzchnią terenu, wykorzystywane są głównie przez rośliny. Wody podziemne i gruntowe zalegające na większych głębokościach wykorzystywane są do zaopatrzenia ludności, przemysłu czy nawodnień rolniczych. Stąd też niezwykle istotna jest wiedza odnośnie głębokości zalegania wód gruntowych i czynników ją kształtujących [Mioduszeński 2003].

Analiza wieloletnich obserwacji, prowadzonych przez Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, pochodzących z piezometrów zlokalizowanych w lewobrzeżnej części doliny Odry, poniżej stopnia wodnego w Brzegu Dolnym, pozwala na ocenę kształtowania się poziomu wód gruntowych w badanych latach, ich zmian i dynamiki. Wody gruntowe w dolinie Odry kształtują się pod wpływem czynników meteorologicznych a także układu hydrogeologicznego [Opracowania zbiorowe 1970–2012]. Jednym z najistotniejszych czynników, kształtujących zwierciadło wody gruntowej w dolinie, są stany wody w Odrze. Poniżej Brzegu Dolnego dno Odry ulega silnym procesom erozji miejscowej i liniowej. Powoduje to obniżanie się stanów wody w rzece i głębokości zalegania wód gruntowych w przyległych terenach. To niekorzystne zjawisko powodowane jest eksploatacją oddanego w 1958 r. stopnia wodnego w Brzegu Dolnym oraz przedłużającą się budową kolejnego stopnia w Malczycach [Pływaczyk 1988, Olszewska 1998, Głuchowska i Pływaczyk 2008]. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie metodyki badania zmienności poziomu wód gruntowych z wykorzystaniem gradientowego pola wektorowego.

CHARAKTERYSTYKA OBSZARU

Obszar badań znajduje się w Polsce w województwie dolnośląskim. Obejmuje wycinek doliny środkowej Odry pomiędzy Brzegiem Dolnym a Malczycami o powierzchni około 80 km². Spadek podłużny doliny kształtuje się w zakresie od 0,1 do 0,5%, spadki poprzeczne natomiast przyjmują wartości od 4 do 15%. Odra na opisywanym odcinku ma charakter typowo nizinnej rzeki. Układ hydrogeologiczny doliny przedstawia się następująco: wierzchnią warstwę stanowią utwory mało prze-

puszczalne o miąższości lokalnie do 2,0 m, natomiast pod nimi zalegają utwory o dobrej przepuszczalności i miąższości do kilkudziesięciu metrów. Taki układ stwarza dobre warunki filtracji wód z Odry w kierunku doliny i odwrotnie. Na analizowanym obszarze dominującym typem gleb są mady ciężkie wytworzone z glin średnich. Obszar w około 60% jest wykorzystywany rolniczo [Pływaczyk 1988, Olszewska 1998, Głuchowska i Pływaczyk 2008].

METODYKA

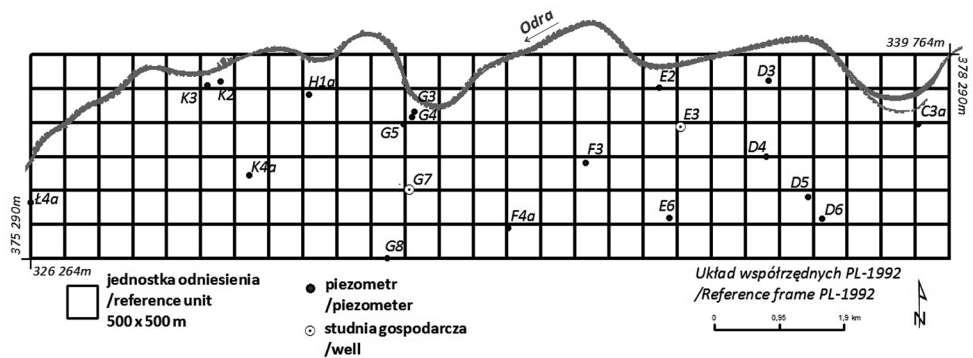
Terminowe (codzienne i cotygodniowe) obserwacje głębokości zalegania wód gruntowych na badanym terenie wykonywane były przez Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu w okresie od 1970 do 2012 roku, z przerwą w latach 1990–1995, średnio w 60 punktach pomiarowych. Przyjęto, że dane wybrane do analiz, których wyniki przedstawiono w pracy, powinny spełniać następujące kryteria: minimum 10-letni przedział czasowy pomiędzy prowadzonymi obserwacjami, zbliżone warunki meteorologiczne (roczna suma opadów, miesięczny rozkład opadów) oraz przebieg rzędnych zwierciadła wody w Odrze (tab. 1). Na tej podstawie analizy przeprowadzono dla danych pochodzących z dwóch lat hydrologicznych – 1976 i 2012. Kształtowanie się głębokości zalegania wód gruntowych porównano dla dwóch kwartałów z 1976 r. – kwiecień, maj, czerwiec (Wariant A) oraz październik, listopad, grudzień (Wariant B) oraz dwóch kwartałów z 2012 r. – kwiecień, maj, czerwiec (Wariant C) oraz październik, listopad, grudzień (Wariant D). Spośród wszystkich punktów pomiarowych na badanym terenie wybrano 20 (18 piezometrów i 2 studnie gospodarcze), które posiadają ciągłość obserwacji poziomu wód gruntowych.

Badanie zmienności zjawisk w czasie wymaga niezmiennych przestrzennie jednostek odniesienia, które pozwalają na określenie wielkości zjawiska w danym momencie oraz śledzenie przebiegu jego zmian. W pracy przyjęto pola geometryczne tworzące sieć skonstruowaną z uwzględnieniem rozkładu punktów pomiarowych

Tabela 1. Miesięczny rozkład opadów atmosferycznych oraz sumy półroczne i roczne dla posterunku opadowego Brzeg Dolny a także rzędne zwierciadła wody w Odrze w przekroju Malczyce dla lat hydrologicznych 1976 oraz 2012

Lata	Miesiące												Rok	Zima	Lato
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI–X	XI–IV	V–X
Opady atmosferyczne [mm]															
1976	34	20	85	13	14	12	62	23	118	65	53	71	570	178	392
2012	1	47	57	53	9	33	25	77	115	83	31	39	570	200	370
Rzędne zwierciadła wody w Odrze [m n.p.m.]															
1976	96,4	96,4	97,6	96,8	96,6	96,6	96,7	96,6	95,9	95,9	96,2	96,2	96,50	96,74	96,25
2012	94,1	94,3	95,1	95,0	96,0	95,5	94,7	94,4	94,2	94,0	94,1	94,3	94,63	95,00	94,26

(rys. 1). Współrzędne skrajnych piezometrów (Ł4a i G8) określiły współrzędne lewego dolnego narożnika siatki. Sieć pól geometrycznych opracowano zgodnie z założeniami systemu Temkart. Wielkość pola siatki 500×500 m przyjęto biorąc pod uwagę cel prowadzonych analiz, wielkość badanego obszaru oraz rozkład punktów pomiarowych i odległości między nimi. W badaniach prowadzonych w odniesieniu do pól geometrycznych wielkość jednostki odniesienia można uznać za skalę obserwacyjną zjawiska, gdyż decyduje ona o stopniu generalizacji i dokładności wykonywanych analiz [Klimczak i in. 2006].



Rys. 1. Rozkład punktów pomiarowych na tle przyjętej sieci jednostek odniesienia

Zaproponowano badanie zmienności poziomu wód gruntowych z wykorzystaniem gradientowego pola wektorowego. Gradient (inaczej gradientowe pole wektorowe) wskazuje kierunki najszybszych wzrostów wartości danego pola skalarnego w poszczególnych punktach, a długość każdej wartości wektorowej odpowiada szybkości wzrostu. Podobnie jak pochodna, gradient opisuje tangens kąta nachylenia wykresu funkcji w danym punkcie i definiuje się go jako wektor n pochodnych cząstkowych tej funkcji [Krysicki i Włodarski 1998]. W prowadzonych badaniach gradient poziomu wód gruntowych (G) w regularnej siatce 500×500 m wyznaczono na podstawie wzoru:

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial W_i}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_j}{\partial y}\right)^2}$$

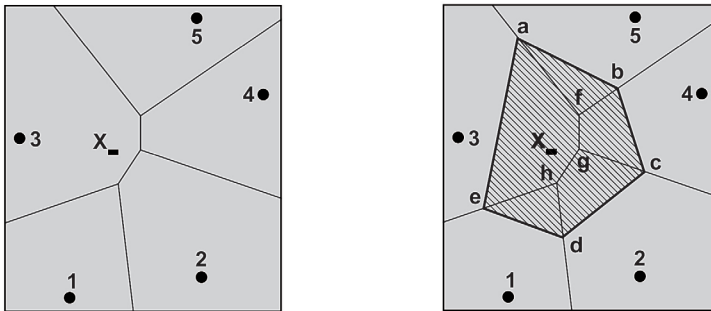
gdzie: $\partial W_i, \partial W_j$ – różnice wysokości poziomu wód gruntowych w sąsiednich węzłach siatki i i j [cm],

$\partial x, \partial y$ – długość boku siatki [m].

Długość wektora oznaczająca szybkość zmian różnic wysokości w poziomie wód gruntowych wyrażona jest w cm/m. W celu wyznaczenia kierunku zmian obliczono azymuty wektorów.

Określenie głębokości zalegania wód gruntowych w węzłach przyjętej sieci pól wymagało stworzenia powierzchni ciągłych prezentujących poziom wód gruntowych

w przyjętych okresach badawczych (kwartałach). Uwzględniając liczbę punktów pomiarowych oraz ich układ przestrzenny wykorzystano algorytm interpolacyjny naturalnego sąsiedztwa (*natural neighbourhood*). Jest to metoda deterministyczna, która wykorzystuje triangulację Delaunay'a w celu przypisania wag punktom wejściowym [Sibson, 1981]. Przykładowy schemat wyznaczenia wysokości punktu interpolowanego metodą naturalnego sąsiedztwa został przedstawiony na rysunku 2. Poligony Thiessena tworzone są dwukrotnie: w pierwszym etapie na podstawie punktów pomiarowych o znanych wartościach, a następnie wokół punktów interpolowanych. Wagą jest stosunek powierzchni części składowej poligonu do jego ogólnej powierzchni. Wysokość interpolowanego punktu (oznaczonego X) jest sumą iloczynów wartości punktów pomiarowych (punktów centralnych poligonów Thiessena) oraz przypisanych im wag.



$$H_x = H_1 \cdot \left(\frac{P_{ehd}}{P_{abcde}} \right) + H_2 \cdot \left(\frac{P_{cdhg}}{P_{abcde}} \right) + H_3 \cdot \left(\frac{P_{afghe}}{P_{abcde}} \right) + H_4 \cdot \left(\frac{P_{bcgf}}{P_{abcde}} \right) + H_5 \cdot \left(\frac{P_{abf}}{P_{abcde}} \right)$$

Rys. 2. Przykładowy schemat wyznaczenia wysokości punktu interpolowanego metodą naturalnego sąsiedztwa [opracowanie własne na podstawie Sibson, 1981]

Poligony Thiessena, zwane również diagramami Voronoi, wyznaczają powierzchnie, wewnątrz których punkty odznaczają się najmniejszą odległością w stosunku do punktu centralnego każdego poligonu. Wagi można więc interpretować jako strefę wpływu wartości znanego punktu na interpolowany.

WYNIKI

Poziom wód gruntowych dla badanych kwartałów lat hydrologicznych 1976 i 2012 wyinterpolowano na badanym obszarze z wykorzystaniem wyżej opisanego algorytmu naturalnego sąsiedztwa (*natural neighbourhood*) w oprogramowaniu ArcGIS. Rozdzielczość rastra wynikowego (50 m) przyjęto biorąc pod uwagę rozkład punktów pomiarowych oraz zmienność badanego zjawiska w przestrzeni. Na wygenerowane ciągle powierzchnie przedstawiające poziom wód gruntowych nałożono

siatkę jednostek odniesienia. Dla węzłów siatki określono wysokości poziomu wód gruntowych (narzędzie *Extract Values to Points*). Wartości te stanowiły dane wejściowe do wyznaczenia gradientu – długości wektora i jego azymutu. W tabeli 2 zestawiono podstawowe statystyki (minimum, maksimum, średnią oraz medianę) obliczonych długości wektorów oraz azymutu w badanych wariantach.

Tabela 2. Podstawowe statystyki obliczonych długości wektorów oraz azymutu

	Wariant A IV, V, VI – 1976		Wariant B X, XI, XII – 1976		Wariant C IV, V, VI – 2012		Wariant D X, XI, XII – 2012	
	Azymut [°]	Długość wektora [cm/m]	Azymut [°]	Długość wektora [cm/m]	Azymut [°]	Długość wektora [cm/m]	Azymut [°]	Długość wektora [cm/m]
Wartość minimalna	2,57	0,01	2,01	0,01	2,17	0,02	2,82	0,01
Wartość maksymalna	356,07	0,30	359,14	0,26	357,56	0,28	359,49	0,31
Średnia	159,27	0,08	155,62	0,08	160,36	0,09	162,77	0,10
Mediana	160,24	0,07	153,82	0,07	151,11	0,08	155,80	0,08

Wartości ekstremalne długości wektorów dla badanych wariantów są zbliżone. Minimalne wartości kształtują się w zakresie od 0,01 do 0,02 cm/m dla poszczególnych wariantów, maksymalne natomiast przyjmują wartości od 0,26 cm/m dla wariantu B do 0,31 cm/m dla wariantu D. Analiza danych pozwala również stwierdzić, iż średnia długość wektora jest porównywalna dla wszystkich 4 wariantów i wynosi ona od 0,08 cm/m dla wariantów A i B do 0,10 cm/m dla wariantu D. Mediana, którą inaczej możemy nazwać wartością przeciętną przyjmuje taką samą wartość dla wariantów A i B – 0,07 cm/m natomiast dla wariantów C i D – 0,08 cm/m.

Zakres wartości długości wektorów jest duży (średnio ok. 0,28 cm/m) co wskazuje na zróżnicowany charakter zmian głębokości zalegania wód gruntowych. Na badanym terenie, występują obszary gdzie zmiany w oczku siatki 500 × 500 m są niewielkie i wynoszą zaledwie 0,01 cm/m, są też strefy gdzie wynoszą one 0,30 cm/m co jest wartością 30-krotnie większą.

Analizując zestawione w tabeli 2 wartości minimalne, maksymalne, obliczonych azymutów w badanych wariantach możemy stwierdzić, iż obejmują one pełen zakres kierunków i są zbliżone dla wszystkich wariantów. Wartości średnie i mediana dla poszczególnych wariantów również kształtują się w podobnym zakresie, wektory najczęściej przyjmują orientację południowo-wschodnią.

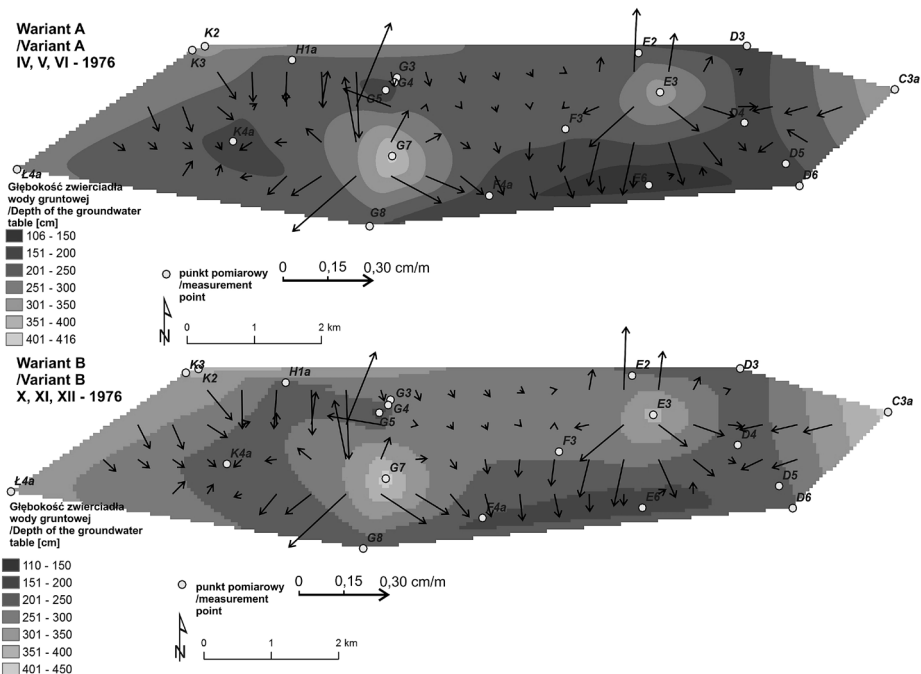
Przestrzenny rozkład wektorów na tle głębokości zalegania wód gruntowych przedstawiony jest na rysunku 3a oraz 3b. Zakres wartości głębokości zalegania wód gruntowych w badanych latach był podobny przyjmując wartość minimalną: 106 cm w wariantcie A, a maksymalną: 503 cm dla wariantu D.

Długość i kierunek wektora wskazuje wielkość oraz stronę, w którą następują zmiany głębokości zalegania wód gruntowych w poszczególnych jednostkach odniesienia.

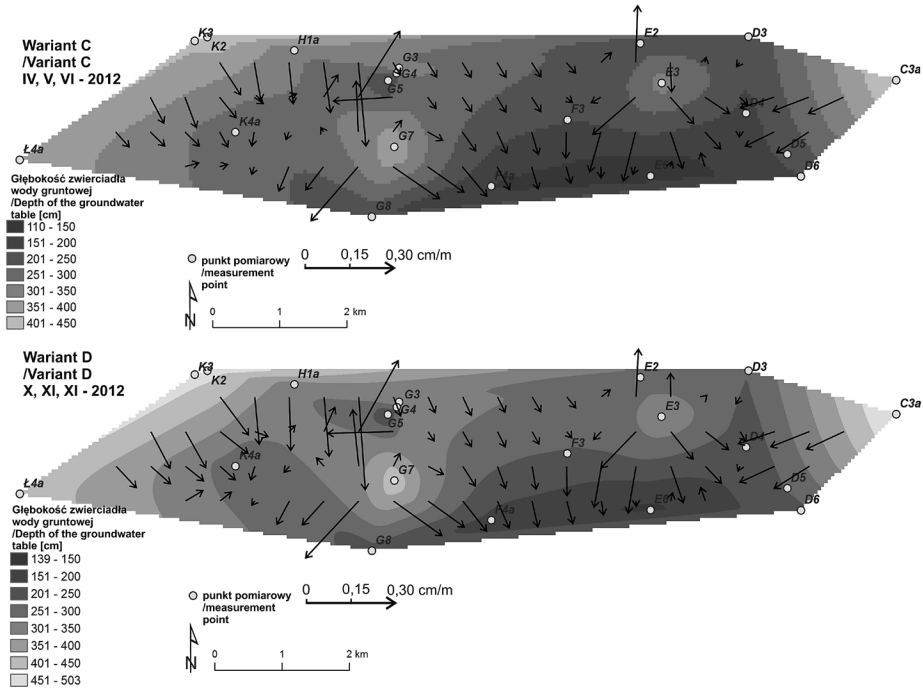
Rozkład wektorów jest równomierny dla większości badanego obszaru. Występują dwa charakterystyczne obszary – wokół studni gospodarczych G7 i E3 – w których kierunek wektorów jest odmienny od sąsiednich. W tych punktach pomiarowych, w przeciwieństwie do pozostałych 18 (piezometry), obserwowano ekstremalne wartości głębokości zalegania wód gruntowych. Może to wskazywać na to iż studnie te (G7 i E3) nadal są eksploatowane tzn. pobierana jest z nich woda gruntowa.

Graficzne przedstawienie wektorów wskazuje, iż zmiany głębokości zalegania wód gruntowych na badanym obszarze zachodzą w orientacji północ-południe, wskazując tym samym na silną zależność kształtowania się wód gruntowych w przyległej dolinie względem odległości od koryta Odry. Wieloletnie badania Instytutu Kształtowania i Ochrony Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu wykazały, iż wraz z odległością od rzeki głębokości zalegania wód gruntowych zmniejszają się [Głuchowska i Pływaczyk 2008, Pływaczyk 1988]. Analiza układu wektorów potwierdziła, iż kierunek zmian głębokości zalegania wód gruntowych odbywa się od koryta rzeki w głąb przyległej doliny.

Porównując układ gradientowego pola wektorowego do znajdującego się pod nim graficznego przedstawienia głębokości zalegania wód gruntowych można stwierdzić, iż są one zbliżone. Oznacza to, że kierunki wektorów wiernie oddają zmiany zachodzące na badanym obszarze.



Rys. 3a. Rozkład wektorów gradientów na tle głębokości zalegania wód gruntowych dla wariantów A i B



Rys. 3b. Rozkład wektorów gradientów na tle głębokości zalegania wód gruntowych dla wariantów C oraz D

WNIOSKI

1. Uzyskane wyniki analiz poziomu wód gruntowych w przyjętym okresie, z zastosowaniem zaproponowanej metodyki, wskazują na zróżnicowane zmiany poziomu wód na badanym obszarze.
2. Graficzne przedstawienie wektorów wskazuje zależność kształtowania się wód gruntowych w przyległej dolinie względem położenia w stosunku do koryta Odry.
3. Rozkład wektorów jest równomierny dla większości badanego obszaru. Gradientowe pole wektorowe jest przydatnym narzędziem do oceny zmian głębokości zalegania wód gruntowych na terenach dolinowych.

PIŚMIENNICTWO

1. Głuchowska B., Pływaczyk L., 2008. Zwierciadło wody gruntowej w dolinie Odry poniżej stopnia wodnego w Brzegu Dolnym. Wyd. UWP, Wrocław.
2. Klimczak H., Galant K., Alkńin M. 2006. Modelling of spatial structure of chosen forms of land cover using reference units. Reports on Geodesy, Vol. 2. No. 77, 161-169.

3. Krysicki W., Włodarski L., 1998. Analiza matematyczna w zadaniach. Cz. II. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
4. McCullagh M., Ross C., 1980. Delaunay triangulation of a random data set for isarithmic mapping. *The Cartographic Journal*, Vol. 17, no 2, Wyd. Maney Publishing, Londyn, Wielka Brytania, 93–99.
5. Mioduszewski W., 2003. Mała retencja – Ochrona zasobów wodnych i środowiska naturalnego – poradnik. IMUZ, Falenty.
6. Olszewska B., 1998. Wpływ budowli piętrzącej na warunki wodne oraz wybrane elementy środowiska przyrodniczego w dolinie na przykładzie Odry w rejonie Brzegu Dolnego. *Zeszyty Naukowe nr 349, Akademia Rolnicza, Wrocław*.
7. Opracowania zbiorowe, 1970–2012. Wpływ projektowanego spiętrzenia Odry stopniem Malczyce na stosunki wodne terenów przyległych. Sprawozdania z badań prowadzonych przez Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu na zlecenie RZGW we Wrocławiu, maszynopisy.
8. Pływaczyk L., 1988. Oddziaływanie Odry na stosunki wodno-melioracyjne doliny w rejonie Brzeg Dolny – Malczyce. *Zesz. Nauk. AR Wrocław, Rozprawy Nr 68, Wrocław*.
9. Sibson R., 1981. A brief description of natural neighbor interpolation. [W:] Barnett V. *Interpreting Multivariate Data*, Wyd. John Wiley & Sons, Nowy Jork, USA, 21–36.