

Możliwości identyfikacji suszy hydrogeologicznej na podstawie monitoringu i modelowania GIS na przykładzie regionu Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego

Jacek Gurwin¹

Identification of hydrogeological drought based on monitoring and GIS modelling on the example of the Lower Odra and Western Pomerania region. *Prz. Geol.*, 63: 738–742.

Abstract. The paper presents the problem of spatial analysis capabilities of hydrogeological drought based on long-term observations of groundwater table fluctuations in the national monitoring network and multi-criteria modelling using GIS tools. An uncomplicated as possible scheme was developed, allowing for rapid qualitative assessment of spatial variability of susceptibility and exposure to drought. The mean values were determined from the annual lowest states of water table for every monitoring point being accepted for analysis. And drought periods were established. Afterwards the map of spatial distribution of drought was created and put in GIS modelling as the input layer together with other appropriate weighted overlay function parameters.

Keywords: Hydrogeological drought, groundwater monitoring, GIS modelling

W pracy przedstawiono problematykę możliwości przestrzennej analizy suszy hydrogeologicznej na podstawie długoletnich obserwacji wahań zwierciadła w punktach badawczych krajowej sieci monitoringu oraz wielokryterialnych analiz z użyciem narzędzi GIS. Należy przy tym wskazać na brak jednoznacznej definicji określenia suszy hydrogeologicznej głównie ze względu na wielopoziomowy charakter systemów wodonośnych. Często susze mogą obejmować płytkie poziomy wodonośne, które pozostają w łączności hydraulicznej z wodami powierzchniowymi, a jednocześnie podobne symptomy nie wystąpią w horyzontach wód głębokiego krążenia. W głębokich poziomach wodonośnych, przy długookresowym braku opadów, dochodzi do długotrwałego obniżenia zwierciadła wód podziemnych poniżej średniego niskiego stanu z wielolecia (SNG), które może trwać nawet przez 2–3 sezony. Reakcja zwierciadła wgłębnych poziomów o charakterze napiętym na zmiany warunków klimatycznych jest przy tym znacznie opóźniona. W płytkich poziomach okresy niżówkowe są przerywane okresami zasilania, dlatego w tym przypadku za suszę hydrogeologiczną należy uznać przedział czasu, w którym zwierciadło wielokrotnie i systematycznie obniża się poniżej SNG. Jest to bowiem wartość przyjmowana jako graniczna w różnych sposobach interpretacji niżówki lub suszy w wodach podziemnych (Tarka & Staško, 2010; Kazimierski i in., 2009; Peters, 2003). Wpływ suszy hydrogeologicznej na poszczególne sektory gospodarki wynika z zapotrzebowania na wodę w obszarach, gdzie pobór w danym sektorze jest najwyższy lub kumulują się pobory na różne cele. Jak podaje Łabędzki (2004), wpływ suszy najbardziej jest widoczny w rolnictwie oraz zaopatrzeniu miast i wsi w wodę, co należy odnosić także do wód podziemnych. Skutki suszy w rolnictwie opisuje Stankiewicz (2007). Tego rodzaju zdarzenia ekstremalne należy analizować w kontekście przedstawianych zmian klimatu i ich wpływu na środowisko naturalne Polski (IMGW, 2011). Bardzo ważne są informacje na temat wieloletnich zmian wysokości sezonowych opadów atmosferycznych,

które w sześćdziesięcioleciu (1951–2010) nie wykazują statystycznie istotnego trendu liniowego (Czarnecka & Nidzgorzka-Lencewicz, 2012).

INTERPRETACJA WYSTĘPOWANIA OKRESÓW SUSZY HYDROGEOLOGICZNEJ

Stwierdzenie wystąpienia suszy gruntowej lub hydrogeologicznej jest czynnością skomplikowaną i często niejednoznaczna. Niewątpliwie analizy tego rodzaju można przeprowadzić wówczas, gdy dysponujemy długoletnimi obserwacjami zwierciadła wód podziemnych, co w ujęciu regionalnym zjawiska suszy jest w praktyce możliwe tylko, gdy bierzemy pod uwagę dane z krajowej sieci obserwacyjno-badawczej wód podziemnych (SOBWP). Informacje z innych sieci monitoringu mogą stanowić cenne uzupełnienie, jeśli ich wiarygodność jest wysoka, a okres obserwacji sięga 25–30 lat. Z uwagi na fakt, że znaczna liczba punktów to nowe lokalizacje, w których obserwacje są prowadzone dopiero od 2000 r. i w dalszych okresach, kiedy sieć została zmodernizowana i przebudowana, punkty te nie mogą być zaliczane. Wiele z nich dotyczy rejonów, gdzie występuje wpływ czynników antropogenicznych, takich jak praca ujęć, odbudowa zwierciadła wód podziemnych czy odwodnienia kopalniane. Na przykład na celowość uwzględniania zjawiska suszy w ocenach oddziaływania górnictwa odkrywkowego węgla brunatnego zwracają uwagę Wachowiak i Kępińska-Kasprzak (2011). Dlatego po weryfikacji jedynie część dostępnych obserwacji może być ostatecznie wykorzystana. W niniejszych badaniach starano się wypracować schemat postępowania możliwie nieskomplikowany, pozwalający na szybką jakościową ocenę przestrzennej zmienności podatności i narażenia na suszę hydrogeologiczną. Przyjmując bowiem, że wahania zwierciadła wód podziemnych odzwierciedlają wpływ wszystkich czynników warunkujących zasilanie (i tym samym jego deficyt w okresie suszy), przestrzenne zróżnicowanie w modelu GIS można uzyskać, uwzględniając fizycznogeo-

¹ Zakład Hydrogeologii Stosowanej ING, Uniwersytet Wrocławski, pl. Maksa Borna 9, 50-205 Wrocław; jacek.gurwin@ing.uni.wroc.pl.

graficzny typ regionu i występowanie regionalnych stref hydrodynamicznych.

Najczęstszym i również jednoznaczny sposobem interpretacji niżówki suszy w wodach podziemnych na podstawie średniego niskiego stanu z wielolecia (SNG) jest wykorzystanie wskaźnika kn , którym bada się wprost odchylenie aktualnego stanu w stosunku do SNG, zgodnie z zależnością:

$$kn = 1 - G/SNG$$

gdzie:

G – aktualna głębokość położenia zwierciadła wody (m),
 SNG – średni niski stan zwierciadła wody z okresu wielolecia, obliczony jako średnia z minimalnych rocznych stanów wód podziemnych dla wielolecia.

Analiza na podstawie wskaźnika kn , wraz z jego ostatnimi modyfikacjami, jest wykorzystywana przez państwową służbę hydrogeologiczną do oceny zagrożenia niżówką gruntową i do przedstawiania zróżnicowania przestrzennego na mapach (Kazimierski, 2012). Jest to również zalecany wskaźnik w opracowanej metodyce ochrony przed suszą (Jarząbek i in., 2013).

Uwzględniając metody wychodzące wprost ze stanu SNG, do identyfikacji okresów i intensywności suszy skutecznie można też zastosować modyfikację przedstawioną przez Tarke i Staśko (2010). Poprzez stosowną analizę statystyczną danych z wielolecia interpretowano okresy trwania suszy hydrogeologicznej. W tym celu zostały wyznaczone wartości średnich niskich stanów (SNG) z najniższych stanów rocznych, następnie obliczono wartości średniej ruchomej, co, przy założeniu, że susza hydrogeologiczna jest procesem długotrwałym, pozwoliło wyeliminować wahania okresowe (sezonowe) oraz odchylenia przypadkowe. W dalszym etapie wyliczono odchylenia otrzymanych w ten sposób wyników od wartości średniej dla całego przyjętego okresu wielolecia. Takie porównanie umożliwia statystyczną analizę nieprzypadkowych zmian w szeregach czasowych. Otrzymane wyniki zostały odniesione do wartości standardowego odchylenia, a ostateczna interpretacja jest oparta na wartościach wyrażonych w procentach. Dzięki temu analiza daje możliwość interpretacji w odniesieniu do poziomów o swobodnym i napiętym zwierciadle wód podziemnych. Charakterystyka intensywności suszy uwzględniała też wystąpienia płytkiej i głębokiej suszy hydrogeologicznej na podstawie stanów charakterystycznych SNG i $1/2 (SNG + NNG)$ (NNG – najniższe obserwowane położenie zwierciadła wód).

Jako okres z występowaniem suszy hydrogeologicznej przyjmowano, zgodnie z koncepcją Staśki i in. (2008), przedział, w którym ujemne odchylenia wartości średniej ruchomej od średniej dla całego okresu obserwacji są większe od 50%. Wykonane w niniejszej pracy analizy wskazały, że przyjęcie odchylenia na tym poziomie dobrze koresponduje z okresami, gdy zwierciadło wód podziemnych zalega poniżej wartości SNG i zwykle jednoznacznie oddaje na wykresie czas trwania suszy (ryc. 1). Na tej podstawie można wyróżnić okresy, w których zaznacza się długotrwała susza hydrogeologiczna obejmująca nawet kilka sezonów (ryc. 1).

PRZESTRZENNA ANALIZA WYSTĘPOWANIA SUSZY HYDROGEOLOGICZNEJ

Interpretacja stanów zwierciadła wód podziemnych na większym obszarze (region hydrogeologiczny, zlewnia, RZGW) zwykle pozwala wstępnie wydzielić 4 podstawowe zakresy, które wskazują stopień podatności na występowanie niżówki/suszy hydrogeologicznej (tab. 1).

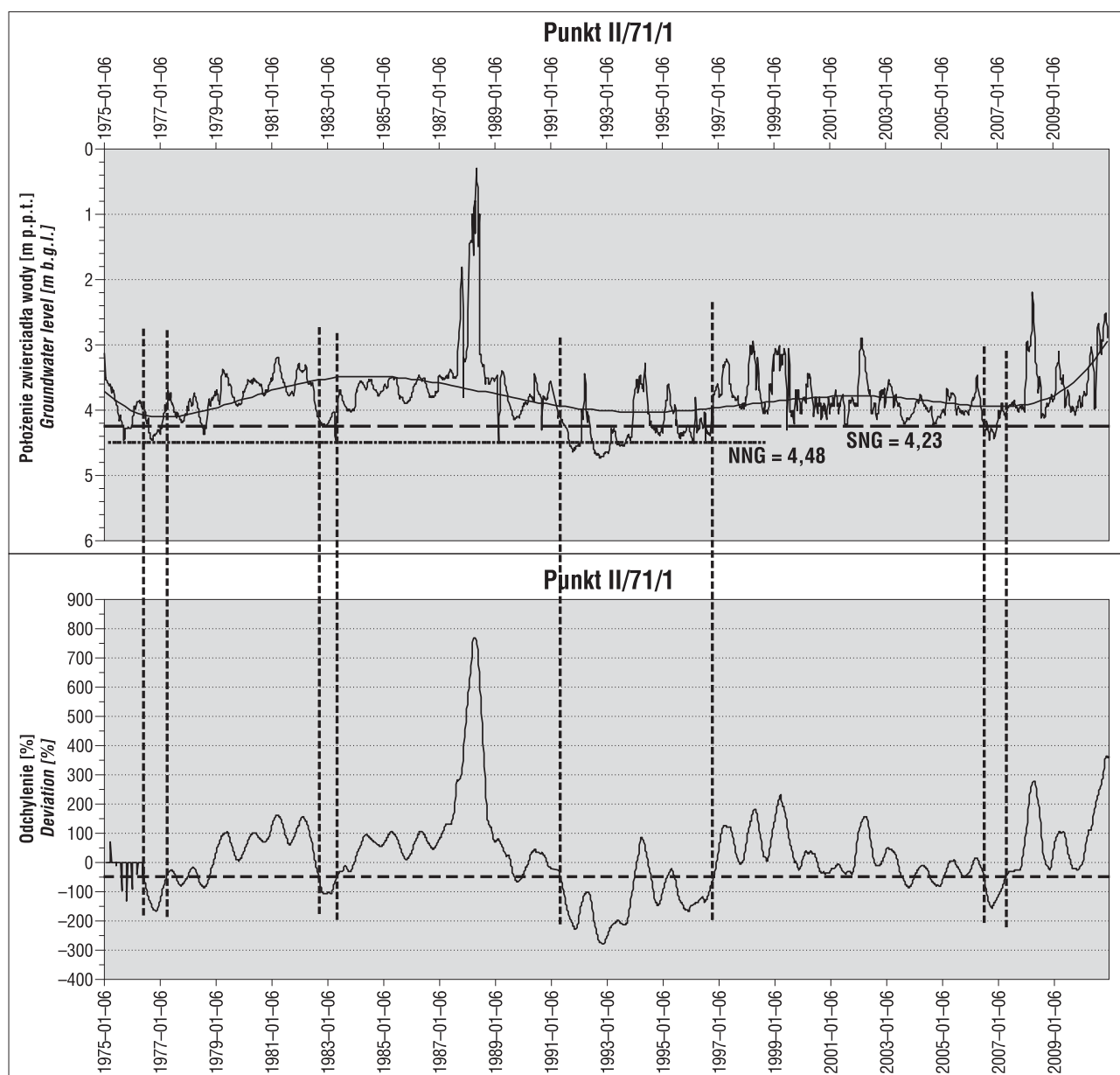
Jednak wszystkie dane punktowe, po przedstawieniu wartości na mapie, wymagają interpretacji przestrzennej, żeby można je było wykorzystać w analizach GIS. W tym celu wykonano interpolację metodą kriginu (Brooker, 1979), jako najbardziej zaawansowaną i sprawdzoną w różnych dziedzinach nauk przyrodniczych, w tym w zagadnieniach hydrogeologicznych. Zwykle wykonywano od kilku do kilkunastu przeliczeń przy różnych parametrach i dopasowanych modelach semivariogramu, uzyskując ostatecznie wiarygodne, geostatystycznie zoptymalizowane rozkłady przestrzenne.

Bardzo ważnym i często wykorzystywanym kryterium w tego typu analizach środowiskowych jest identyfikacja stopnia podatności obszaru na określone zjawisko. Obszary podatne na występowanie suszy hydrogeologicznej zależą od lokalizacji w stosunku do regionalnego systemu krążenia wód podziemnych. Brak opadów i zasilania infiltracyjnego dotyka najszybciej i w największym stopniu regionów alimentacji, gdzie są formowane zasoby wód podziemnych. Ponieważ pozycja w systemie hydrodynamicznym warunkuje intensywność i przebieg niżówki, a tym samym potencjalnej suszy, mapa stref hydrodynamicznych (ryc. 2) stanowi ważną warstwę w analizie wieloczynnikowej modelu GIS. Dokonano klasyfikacji tej mapy, przyjmując najwyższy wskaźnik dla stref zasilania (6), średni dla stref tranzytu (3) oraz najniższy dla stref drenażu (1). W przypadku tych ostatnich intensywność suszy jest słabsza; są to strefy najmniej podatne na jej wpływ.

Przeliczenia modelu dały w rezultacie wynikową mapę podatności obszaru na występowanie suszy hydrogeologicznej (ryc. 3). W ten sposób zidentyfikowano rejony silnej (klasa I), średniej (klasa II), słabej (klasa III) i bardzo słabej (klasa IV) podatności na występowanie suszy hydrogeologicznej.

Analiza może być dodatkowo wspomagana podziałem rejonu ze względu na jednostki fizycznogeograficzne (Gurwin, 2014), gdyż w odróżnieniu od terenów wyżynnych i wysoczyznowych stabilizująca rola dolin rzecznych czy też obszarów jeziornych decyduje o mniejszej intensywności suszy w wodach podziemnych w tych rejonach. W prezentowanym przykładzie tego podziału nie uwzględniono.

W dalszej analizie GIS wykorzystano elementy mające wpływ na stopień narażenia obszaru na zjawisko suszy hydrogeologicznej. Model wielokryterialny można tak konstruować, żeby uwzględniał dostępne dane i warstwy informacyjne na temat użytkowania wód podziemnych. Można w tym celu wykorzystać mapy rozkładu poboru wód podziemnych (rzeczywiste, według pozwoleń wodnoprawnych, rejestrowane i nierejestrowane), stopnia szcerpania zasobów, występowania lejów depresji, obszarów górniczych czy też obszarów chronionych (ekosystemy od wód zależne). Pomocne są tu dane na temat struktury



Ryc. 1. Przykład interpretacji okresów suszy hydrogeologicznej dla wybranego punktu monitoringu wód podziemnych (studnia wiercona II/71/1, miejscowość Głazów)

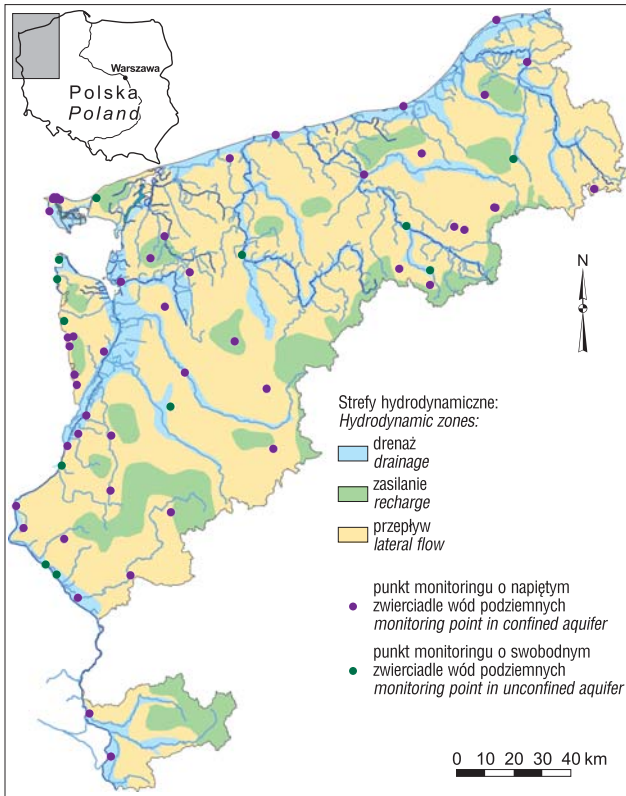
Fig. 1. Example of hydrogeological drought interpretation for the groundwater monitoring point (borehole II/71/1 in Głazów)

poborów, opracowywane przez PSH (Frankowski i in., 2009). Tym samym za obszar narażony na skutki suszy uznajemy region, w którym może dojść do potencjalnego niedoboru wód na cele zaopatrzenia ludności oraz gospodarki. Wydaje się, że presja wynikająca z eksploatacji wód podziemnych powinna być oceniana przede wszystkim na

podstawie rzeczywistych poborów i ich odniesienia do wielkości zasobów wybranego obszaru. Ostateczne zestawienie stopnia użytkowania z danymi na temat suszy na mapach wskazuje, które rejony są potencjalnie najbardziej zagrożone wytworzeniem się niedoborów zasobów. Analizy w powyższym zakresie dają wówczas możliwość doko-

Tab. 1. Stopień podatności na wystąpienie suszy hydrogeologicznej
Table 1. Vulnerability to hydrogeological drought

Nr No.	Stopień podatności na wystąpienie suszy hydrogeologicznej <i>Vulnerability to hydrogeological drought</i>	Występowanie stanów granicznych [%] <i>Occurrence of boundary conditions [%]</i>
I	Mało podatne / <i>Weakly vulnerable</i>	<15%
II	Umiarkowanie podatne / <i>Moderately vulnerable</i>	15–25%
III	Podatne / <i>Vulnerable</i>	25–35%
IV	Bardzo podatne / <i>Highly vulnerable</i>	>35%



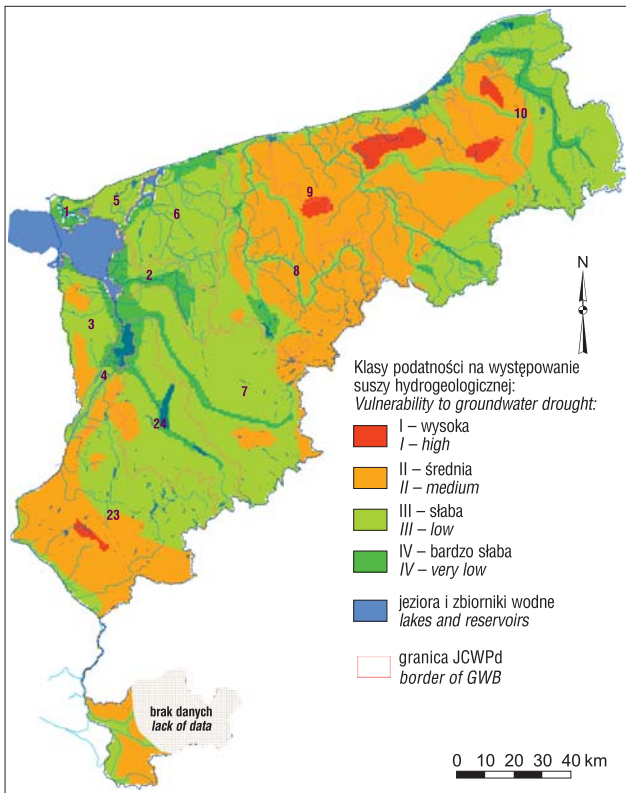
Ryc. 2. Rozkład stref hydrodynamicznych w regionie wodnym Dolnej Odry i Pomorza Zachodniego
Fig. 2. Distribution of hydrodynamic zones in the water region of the Lower Odra and Western Pomerania

nania hierarchizacji obszarów (gmin, JCWPd) pod kątem narażenia na skutki suszy.

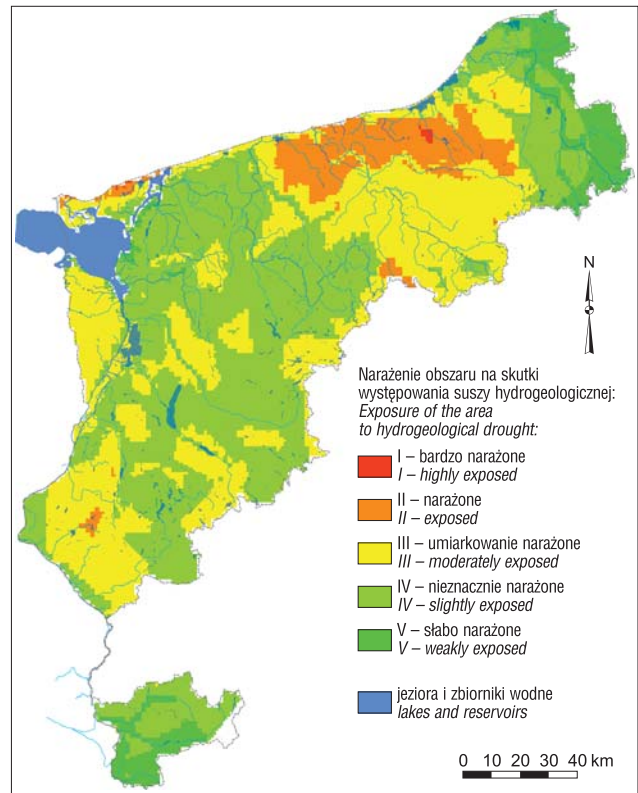
W prezentowanym przykładzie wykorzystanie narzędzi oprogramowania GIS pozwoliło na przeprowadzenie analizy wielokryterialnej pomiędzy sporządzonymi warstwami informacyjnymi. Po przetworzeniu na obrazy rastrowe i po reklasyfikacji wybranych do analizy warstw dokonano przeliczenia wartości w sześciopunktowej skali, w której wyższa cyfra jest przypisana wyższemu zakresowi zmiennej. Następnie każdej warstwie nadano odpowiedni współczynnik rangowy w zależności od wagi czynnika w kształtowaniu zagrożenia obszaru na suszę hydrogeologiczną. Po przetestowaniu kilku modeli ustalono następujące parametry: 1) występowanie okresów suszy – 40% wpływu, 2) położenie w strefie hydrodynamicznej – 20% wpływu, 3) wielkość rzeczywistego poboru w przeliczeniu na jednostkę powierzchni – 5% wpływu, 4) stan rezerw zasobowych odniesiony do SCWP/JCWPd (scalone części wód powierzchniowych / jednolite części wód podziemnych) – 35% wpływu. Ostatecznym efektem obliczeń modelu jest wynikowa mapa przedstawiająca klasyfikację narażenia obszaru na skutki suszy hydrogeologicznej w 5-stopniowej skali (ryc. 4). Podobne, bardziej szczegółowe wyniki prac dotyczących analizy suszy hydrogeologicznej z wykorzystaniem modelowania GIS dla regionu dolnośląskiego przedstawiono w pracy Gurwina (2014).

PODSUMOWANIE

Problematyka ekstremalnych stanów pogodowych i suszy pozostaje bardzo ważnym i aktualnym wyzwaniem w ba-



Ryc. 3. Podatność obszaru na występowanie suszy hydrogeologicznej
Fig. 3. Vulnerability to hydrogeological drought



Ryc. 4. Narażenie obszaru na skutki występowania suszy hydrogeologicznej
Fig. 4. Exposure of the area to hydrogeological drought

daniach hydrogeologicznych, dlatego należy rozwijać i optymalizować krajową sieć monitoringu wód podziemnych, która powinna dostarczać niezbędnych długoletnich (najlepiej powyżej 30 lat) obserwacji do prowadzenia regionalnych prac badawczych. Zaprezentowane wyniki są próbą integracji analizy danych monitoringowych z technikami GIS w celu wypracowania optymalnego narzędzia informacyjnego do oceny zagrożenia suszą hydrogeologiczną. Jest to ocena jakościowa, zależna od przyjętego ostatecznie modelu obliczeniowego i wprowadzonych warstw informacyjnych.

Model może być zatem odpowiednio modyfikowany lub rozbudowywany zgodnie z posiadanymi danymi wejściowymi. Nie należy go stosować szablonowo, nie jest to schemat uniwersalny i każdorazowo musi uwzględniać całokształt hydrogeologicznych i geograficzno-przyrodniczych warunków oraz specyfikę danego terenu. W obszarach klasyfikowanych jako potencjalnie najbardziej narażone na skutki suszy należy rozważyć działania ograniczające jej skutki. Niewątpliwie, jednym z najważniejszych elementów przeciwdziałania suszy, oprócz optymalizacji poborów, jest retencjonowanie wód, w tym mała retencja wodna (Łoś, 2002).

LITERATURA

- BROOKER P. 1979 – Kriging. *Engineering and Mining J.*, 180 (9): 148–153.
- CZARNECKA M. & NIDZGORSKA-LENCEWICZ J. 2012 – Wieloletnia zmienność sezonowych opadów w Polsce. *Woda, Środowisko – Obszary Wiejskie*, 12/2 (38): 45–60.
- FRANKOWSKI Z., GAŁKOWSKI P. & MITRĘGA J. 2009 – Struktura poboru wód podziemnych w Polsce. *Informator PSH, Państw. Inst. Geol., Warszawa*.
- GURWIN J. 2014 – Long-term monitoring and GIS based determination of groundwater drought propagation, the Lower Silesia region, SW Poland. *Episodes*, 37 (3): 172–181.
- IMGW 2011 – Projekt KLIMAT, Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo, zad.1 Zmiany klimatu i ich wpływ na środowisko naturalne Polski oraz określenie ich skutków ekonomicznych. Warszawa-Gdynia-Kraków.
- JARZĄBEK A., SARNA S. & KARPIERZ M. 2013 – Ochrona przed suszą w planowaniu gospodarowania wodami. RS-Eko, Kraków.
- KAZIMIERSKI B. (red.) 2012 – Rocznik hydrogeologiczny PSH. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KAZIMIERSKI B., CABALSKA J., MIKOŁAJCZYK A. & PILICHOWSKA-KAZIMIERSKA E. 2009 – Ocena zagrożenia suszą hydrogeologiczną (gruntową) na obszarze Polski. [W:] *Materiały XVIII Ogólnopolskiego Sympozjum Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego*, Szymbark.
- ŁABĘDZKI L. 2004 – Problematyka susz w Polsce. *Woda, Środowisko – Obszary Wiejskie*, 4/1 (10): 47–66.
- ŁOŚ M.J. 2002 – Mała retencja – nadzieje i ograniczenia. *Gospodarka Wodna*, z.8, Wyd. Sigma, Warszawa.
- PETERS E. 2003 – Propagation of drought through groundwater systems. Illustrated in the Pang (UK) and Upper-Guadiana (ES) catchments: Dissertation Wageningen Universiteit, Wageningen 2003.
- STANKIEWICZ D. 2007 – Skutki suszy w rolnictwie polskim. *Infos nr 6*.
- STAŚKO S., OLICHWER T. & TARKA R. 2008 – Susza hydrogeologiczna w Sudetach. [W:] *Zarządzanie zasobami wodnymi w dorzeczu Odry*. RZGW Wrocław: 37–46.
- TARKA R. & STAŚKO S. 2010 – Wahania zwierciadła wód podziemnych jako odzwierciedlenie ekstremalnych sytuacji pogodowych. [W:] *Migoń P. (red.), Wyjątkowe zdarzenia przyrodnicze na Dolnym Śląsku i ich skutki*. U.Wr., Wrocław.
- WACHOWIAK G. & KĘPIŃSKA-KASPRZAK M. 2011 – Susze w Polsce i celowość uwzględniania tego zjawiska w ocenach oddziaływania górnictwa odkrywkowego węgla brunatnego na środowisko. IMGW, Poznań.