

Tamara Tokarczyk

WSKAŹNIKI OCENY SUSZY STOSOWANE W POLSCE I NA ŚWIECIE

WIDELY APPLIED INDICES FOR DROUGHT ASSESSMENT AND POLISH APPLICATION

Streszczenie

W literaturze światowej i polskiej znaleźć można wiele charakterystyk oraz wskaźników opisu suszy i innych mówiących o potrzebach wodnych. Ich zastosowanie zależy głównie od celu oraz dostępności danych. Przedstawiane są one w różnych skalach przestrzennych i czasowych, od skali regionalnej do globalnej. Często służą one do podejmowania decyzji w rolnictwie i gospodarce. Takie zastosowanie narzuca podejście metodyczne tzn. otrzymane wyniki powinny być porównywalne dla różnych obszarów. W związku z powyższym wskaźniki suszy najczęściej wyrażone są jako pojedyncza wartość odnoszona do wybranego obszaru, czy zlewni. Niektóre wskaźniki, najprostsze do określenia, mówią o różnicy sumy opadu z analizowanego przedziału czasowego i norm ustalonych na podstawie materiału historycznego. Inne wykorzystują więcej informacji np. o temperaturze, pokrywie śnieżnej, zasilaniu wodami powierzchniowymi i podziemnymi itp. Mimo, że trudno ocenić, który wskaźnik jest najlepszy, dla każdego obszaru można znaleźć taki, który lepiej opisuje dane warunki przyrodnicze i klimatyczne. W pracy zamieszczono przegląd wskaźników opisu suszy szeroko stosowanych na świecie i w Polsce oraz przedstawiono wyniki zastosowania wybranych wskaźników dla obszaru zlewni Nysy Kłodzkiej.

Słowa kluczowe: wskaźniki suszy, susza atmosferyczna, susza hydrologiczna, niżówka *Summary*

Summary

Nowadays, in literature there are a lot of indices and factors designed to assess drought periods and water needs. Indices are presented in different spatial and temporal scale, from regional to global and chiefly are dedicated to agriculture and economy for making decision. Their application mainly depends on target

and data availability. Such application imposes methodological approach; it means that obtained results should be comparable for different regions. Therefore drought indices are expressed as single number related to selected region. Some of them, especially the ones that are simple to calculate, are based only on one feature - precipitation for instance as a difference between total precipitation from investigated period and established norm from multiyear data. Others indices are based on more features as temperature, snow-cover, surface water and groundwater supply etc. Although it is hard to select a priori which index is the most effective, for each region the one that matches the best local environment and climatic conditions should be appointed. The paper presents a survey of indices for drought assessment and the results obtained for selected indices in Nysa Klodzka basin.

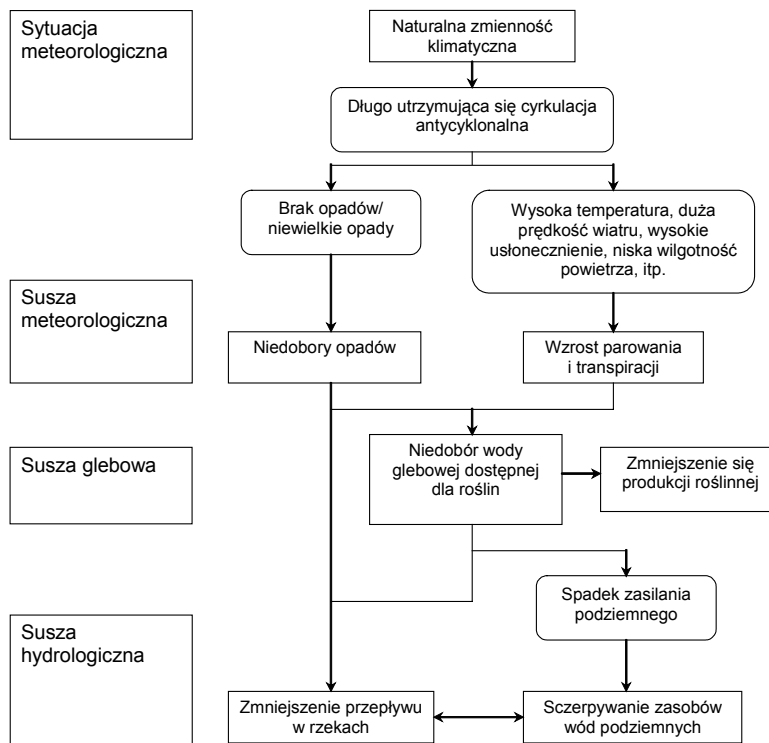
Key words: *drought indices, atmospheric drought, hydrological drought, low flow*

WPROWADZENIE

Susza jest zjawiskiem złożonym o wymiarze fizycznym i społecznym, o powszechnym znaczeniu, a mimo to trudnym do zdefiniowania. Dotychczas nie ma jednej uniwersalnej, zaakceptowanej definicji suszy, ponieważ w odróżnieniu od powodzi susza nie jest pojedynczym, wyraźnym zdarzeniem, ale często jest rezultatem wielu złożonych czynników wzajemnie oddziałujących na siebie. Dodatkową trudność w zdefiniowaniu suszy stanowi określenie jej początku i końca. Zazwyczaj jest oceniana na podstawie materiałów historycznych, po zakończeniu zdarzenia. Wiąże się to również z faktem, że w okresie bezopadowym może wystąpić krótki czas z opadami, jednak niewystarczającymi do wypełnienia niedoborów. Susza jest cechą klimatu określana jako zauważalny brak wody, który powoduje szkody w środowisku i gospodarce, a także wyraźną uciążliwość lub nawet zagrożenie dla ludności [Hisdal, Tallaksen 2000]. Susza nie powinna być łączona z suchością, którą charakteryzują się regiony o klimacie suchym, w których naturalnie występuje znacznie mniejsza dostępność wody. Zespół badaczy skupiony w projekcie Flow Regimes from International Experimental and Network Data (FRIEND), Low Flow & Drought Group wypracował definicję, która mówi, że susza jest zjawiskiem ciągłym o zasięgu regionalnym charakteryzowanym przez odchylenie od warunków normalnych dla opadów, wilgotności glebowej, położenia zwierciadła wody gruntowej oraz przepływów w rzekach.

CZYNNIKI WYWOŁUJĄCE SUSZE

Naturalnymi czynnikami powszechnie ocenianymi przy występowaniu suszy są warunki pogodowe, hydrologiczne oraz jakość wody. Wzajemne ich oddziaływanie obrazuje poniższy schemat rozwoju suszy w ujęciu cyklu hydrologicznego (rys. 1).

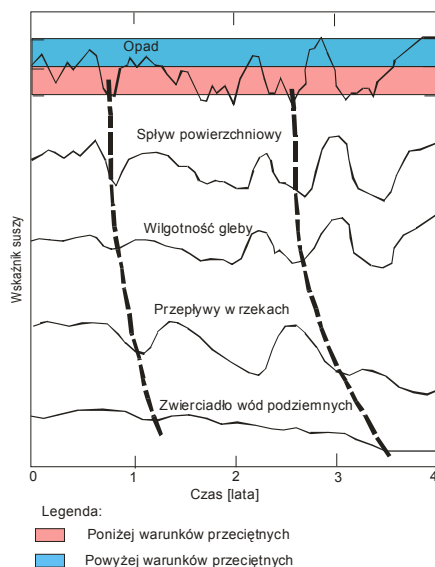


Rysunek 1. Propagacja suszy w cyklu hydrologicznym [Stahl, 2001]

Takie podejście w konsekwencji prowadzi do stosowania wielu kryteriów przy ocenie suszy zawierających jeden lub kilka parametrów w postaci: opadu, przepływu w rzekach, odpływu, ewapotranspiracji, poziomu wód podziemnych, zaopatrzenia w wodę oraz potrzeb wodnych.

Czasową złożoność suszy i jej wpływu na poszczególne komponenty cyklu hydrologicznego przedstawiono na rysunku 2.

Początek suszy na ogół związany jest z długotrwałym brakiem opadów lub ich niedoborem oraz wysoką temperaturą. Częstość niedoboru opadów oraz ich intensywność wyrażają lata lub okresy suche. W konsekwencji suszy atmosferycznej dochodzi do zmian ilościowych w cyklu hydrologicznym. Dodatkowo ciągła ewapotranspiracja powoduje obszarowe zmniejszenie spływu powierzchniowego, spadek wilgotności gleby (susza glebowa), zmniejszania się przepływów w wodach powierzchniowych oraz spadek zwierciadła wód podziemnych (susza hydrologiczna). Susza hydrologiczna wyraża nie tylko brak opadów lub ich niedobór, ale także spadek zasilania powierzchniowego i podziemnego, co nierozdzielnie związane jest z warunkami fizjograficznymi oraz geologicznymi obszaru.



Rysunek 2. Przenoszenie deficytu opadu na elementy cyklu hydrologicznego w czasie [Changnon 1987]

Tabela 1. Oddziaływanie suszy na inne dziedziny

Dziedzina	Oddziaływanie	
	Bezpośrednie	Pośrednie
Środowisko (ekologia)	<ul style="list-style-type: none"> - wilgotność glebowa - poziom wód podziemnych - wydajność źródeł - przepływ w rzekach - poziom wód w jeziorach i zbiornikach wodnych - prędkość spływu wód 	<ul style="list-style-type: none"> - jakość wód - produkcja roślinna - siedlisko - gatunki zagrożone - burze pyłowe - pożary lasu
Gospodarka	<ul style="list-style-type: none"> - pobór wód podziemnych - pobór wód powierzchniowych - odpływ ze zbiorników retencyjnych - pobór wody przez rośliny 	<ul style="list-style-type: none"> - woda do nawadniania - woda na cele bytowe - nieurodzaj - woda dla zwierząt hodowlanych - żegluga - elektrownie - żywność i pasza dla zwierząt - wzrost gospodarczy
Spółeczeństwo	<ul style="list-style-type: none"> - woda do picia 	<ul style="list-style-type: none"> - konflikty użytkowników wód - zatrudnienie - klęska głodu - ubóstwo - zdrowie - migracja - śmiertelność

Susza hydrologiczna różni się od innych zjawisk hydrologicznych zarówno czasowym i przestrzennym zasięgiem, jak i wpływem na pozostałe dziedziny. Nawet, jeśli ich bezpośredni negatywny wpływ jest niewielki lub o nieznacznym zasięgu, to obserwowany wpływ pośredni może być znaczny i długotrwały. Poniżej zestawiono przykłady takiego oddziaływania.

Na istotę problemu suszy wskazuje bezpośrednio lub pośrednio oddziaływanie w wielu dziedzinach. W związku z powyższym istnieje potrzeba opisu suszy uwzględniając kilka punktów widzenia. Inaczej zostaną przeprowadzone opis i ocena suszy z punktu widzenia środowiska, inne podejście wypływa zaś z potrzeb gospodarczych czy społecznych. W związku z tym wielu badaczy [Alley 1984, McKee i in. 1993; Shafer, Dezman 1982; Gibbs, Maher 1967] opracowało wiele współczynników i wskaźników opisu suszy, które omówiono poniżej.

WYBRANE WSKAŹNIKI OCENY SUSZY

Wielowymiarowość zjawiska suszy spowodowała bardzo różnorodne podejście do zagadnienia. Większość wskaźników obliczana jest na podstawie obserwacji meteorologicznych: opadu i temperatury. Dane te są zazwyczaj łatwo dostępne w całym świecie w porównaniu do innych typów danych, co częściowo tłumaczy szerokie ich zastosowanie. Susze można oceniać również, wykorzystując inne źródła danych, jak np.: przepływy w rzece, zdjęcia satelitarne.

Ogólnie można przyjąć, że część badaczy reprezentuje podejście koncepcyjne oraz statystyczne, które wykorzystuje statystykę i rachunek prawdopodobieństwa.

W podejściu koncepcyjnym zjawisko suszy opisuje się stosując parametry w postaci różnych wskaźników i współczynników, np. Palmer Drought Severity Index (PDSI – wskaźnik surowości suszy Palmera), Standardized Precipitation Index (SPI – wskaźnik standaryzowanego opadu), Effective Drought Index (EDI – wskaźnik suszy efektywnej), Surface Water Supply Index (SWSI – wskaźnik zaspokajania potrzeb wodami powierzchniowymi) itp. Mawdsley [Hisdal, Tallaksen 2000] dzieli współczynniki na dwie grupy, tj.: współczynniki środowiskowe zawierające wszelkie wskaźniki hydro-meteorologiczne (np. PDSI, SPI) oraz hydrologiczne (np. EDI), które mają bezpośredni wpływ na cykl hydrologiczny (opad, przepływ, wilgotność glebowa). Wskaźniki te mogą służyć do analizy częstości występowania okresów niżówkowych i najczęściej mówią o odchyleniu od wartości średniej. Drugim rodzajem są wskaźniki charakteryzujące zasoby wodne (np. SWSI). Określają one surowość suszy pod względem wpływu suszy na zaopatrzenie w wodę na cele bytowe, rolnicze, na potrzeby przemysłu, rekreacji itp. Charakteryzują one zarówno wpływ działalności człowieka na wzrost zużycia wody, jak i zmniejszenie się opadów czy ich brak, czyli ogólnie

mówiąc określają niedobór wody w stosunku do potrzeb. W ujęciu statystycznym można zauważyć kilka różnych podejść do oceny zjawiska, tj. jako:

– analiza szeregów czasowych opadów lub przepływów z wielolecia lub okresu, przepływu minimalnego n-dniowego lub przepływu o określonym prawdopodobieństwie nieprzekroczenia z krzywej sum czasów trwania. Takie podejście pozwala np. na charakterystykę reżimu w odniesieniu do przepływów;

– jako proces zmienny w czasie. W tym podejściu charakteryzowana jest susza hydrologiczna, którą w rzece obserwuje się postaci okresów niżówkowych lub krzywych opadania [Radczuk, Szarska 1986]. Wydzielone okresy niżówkowe opisane są parametrami charakteryzującymi czas trwania, objętość niedoboru oraz przepływ najniższy. Do wydzielenia okresów powszechnie stosuje się metodę przepływu granicznego [Tokarczyk 2001; Tokarczyk, Jakubowski 2006].

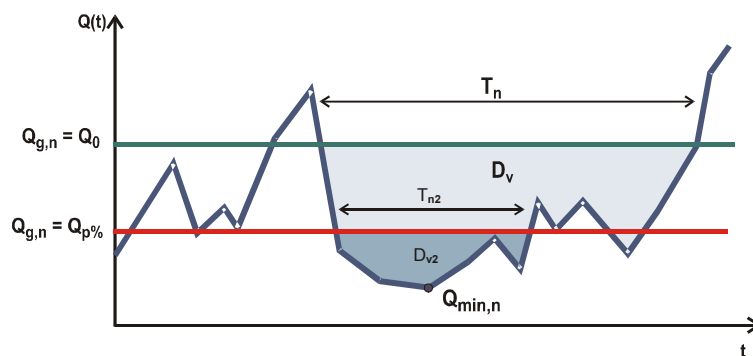
Ostatnio coraz więcej prac badawczych i wdrożeniowych poświęconych jest zagadnieniom występowania susz hydrologicznych w ujęciu czasowym i przestrzennym, ocenie ryzyka ich występowania oraz ich prognozowaniu.

W niniejszej pracy spośród wielu szeroko opisanych w literaturze wskaźników i metod stosowanych w świecie i w Polsce do oceny i opisu suszy wybrano 4 oparte na analizie: krzywej sum czasów trwania przepływów, okresów niżówkowych, wskaźnika standaryzowanego opadu i klimatycznego bilansu wodnego kilka. Wybór wskaźników podyktowany był i warunkami obszaru badań zlewni Nysy Kłodzkiej, który jest zróżnicowany pod względem wielkości opadów i ewapotranspiracji, a także warunków hydrogeologicznych i geologicznych.

Krzywa sum czasów trwania przepływów. Krzywa sum czasów trwania przepływów zwana również krzywą kumulacyjną częstości przepływów charakteryzuje reżim hydrologiczny rzeki. Jest ona stosowana do przedstawienia reżimu hydrologicznego obecnego w stosunku do całego okresu obserwacji przez służby amerykańskie US Geological Survey [<http://water.usgs.gov>]. Dla wszystkich jednoimiennych dni roku sporządza się krzywe kumulacyjne częstości przepływów z wielolecia. Na tych krzywych wydziela się 5 klas. Klasy odpowiadają warunkom wilgotnościowym, którym przyporządkowuje się przedziały prawdopodobieństwa przewyższenia przepływów. Klasa od 0 do 10 % – reprezentuje warunki bardzo mokre (ciemnoniebieski kolor na wykresie, rys 4.), klasa 10–25% - warunki mokre (jasnoniebieski kolor na wykresie, rys 4.), klasa 25–75% - warunki przeciętne (szary kolor na wykresie, rys. 4), klasa 75–90% warunki suche (żółty kolor na wykresie, rys. 4.), natomiast klasa od 90–100% – warunki bardzo suche (czerwony kolor na wykresie). Przepływy przedstawiano w skali logarymicznej. Nałożenie na tak sporządzony wykres codziennych przepływów roku bieżącego pozwala na szybką ocenę obecnego reżimu w odniesieniu do warunków określonych na podstawie wielolecia.

Okresy niżówkowe. W literaturze światowej utożsamia się niżówkę z suszą hydrologiczną stosując te terminy zamiennie [Hisdal, Tallaksen 2000]. Przyjmuje się zatem, że obserwowane przepływy niżówkowe w rzece są odzwierciedleniem suszy hydrologicznej panującej w zlewni. Również Międzynarodowy Słownik Hydrologiczny (WMO 1974) definiuje susze jako okres, w którym przepływy niskie utrzymują się w suchych warunkach pogodowych. Warunkiem koniecznym do wystąpienia niżówki jest brak spływu powierzchniowego, jednak nie zawsze przy jego braku pojawia się niżówka. Płynące wtedy korytem wody pochodzą jedynie z drenowanych przez nią poziomów wodonośnych, a w miarę wyczerpywania ich zasobów maleje przepływ w rzece.

Do opisu okresów niżówkowych najczęściej stosowana jest metoda przepływu granicznego. Przyjęcie wartości przepływu granicznego Q_0 , poniżej którego obserwowane są niżówki w rzece pozwala na jednoznaczną identyfikację parametrów, tj.: czasu trwania (T_n), objętości deficytu (D_v) oraz przepływu najniższego ($Q_{min,n}$) (rys. 3).



Rysunek 3. Parametry niżówki

Z hydrologicznego punktu widzenia istotnym problemem jest określenie wartości granicznej niżówki związane z jej początkiem i końcem. Gdy przepływy w rzece są poniżej przyjętej wartości granicznej Q_0 , wtedy mówimy o początku niżówki, natomiast gdy przepływy wzrastają powyżej Q_0 , obserwujemy koniec niżówki. Kryterium wyznaczania przepływu granicznego jest istotnym problemem, a przy jego wyznaczaniu mogą być stosowane różne kryteria: hydrologiczne, gospodarcze, ekologiczne. Rodzaj przyjętego kryterium zależy od celu opracowania i powinien być merytorycznie uzasadniony, a uzyskane wyniki powinny być w odpowiedni sposób zinterpretowane [Ozga-Zielńska, Brzeziński 1997]. Wartością zalecaną przez badaczy skupionych w Projekcie FRIEND jest przepływ $Q_{70\%}$ otrzymany z krzywej sum czasów trwania wraz z wyższymi. Wartość ta jest coraz częściej stosowanym przepływem granicznym w Polsce i w Europie i zawiera się w przedziale od WNQ do SNQ.

Dobór odpowiedniego kroku czasowego kwantyfikującego prowadzone obserwacje i pomiary jest również istotnym problemem rzutującym na opis zjawiska suszy hydrologicznej. Elementy hydrologiczne mierzone są na ogół w sposób dyskretny. Ustalenie odpowiedniej jednostki czasu jest bardzo ważne zarówno z punktu widzenia definicji niżówki, jak i jej dalszej analizy. Yevjevich, wprowadzając metodę przepływu granicznego proponował miesięczny krok czasowy lub dłuższy. Wielu badaczy stosuje przepływy codzienne [Dubicki 2002]. Takie podejście wiąże się z problemem wydzielenia niezależnych sąsiadujących z sobą niżówek oraz z odcięciem niżówek nieistotnych o bardzo małych deficytach i krótkich czasach trwania. W niniejszej pracy przy wydzieleniu niezależnych niżówek następujących po sobie przyjęto następujące założenia:

- jeśli objętość niżówki $D_v \leq 0,005 D_{v,max}$ to są one odrzucane,
- jeśli kolejne niżówki są rozdzielone przepływami większymi od przepływu granicznego i trwają 1 lub 2 dni, to ich objętość przepływu i czas trwania są sumowane,
- minimalny czas trwania niżówki wynosi 5 dni [Jakubowski 1997].

Wskaźnik standaryzowanego opadu (SPI Standardized Precipitation Index). Wskaźnik standaryzowanego opadu SPI został opracowany przez McKee, Doeskeni i Kleist [1993] do ilościowej oceny deficytu opadu w różnej skali czasowej. Skala czasowa odzwierciedla wpływ suszy na dostępność różnych zasobów wodnych (wilgotność gleby, przepływy w rzekach, wody podziemne). Warunki wilgotnościowe gleb odpowiadają anomalii opadowym w relatywnie krótkim czasie, zaś przepływ w rzekach, wody podziemne oraz zasilanie zbiorników reagują na anomalie opadowe trwające dłuższy czas. Z tego powodu McKee i in. [1993] obliczyli pierwotnie wskaźnik SPI dla 3-, 6-, 12-, 24-, i 48-miesięcznej skali czasowej. Wskaźnik SPI dla dowolnego obszaru określa się na podstawie długich szeregów opadowych dla żądanych okresów, dla których dobiera się rozkład prawdopodobieństwa Gamma, który jest następnie transformowany w rozkład normalny. Parametry rozkładu szacowane są metodą największej wiarygodności. Dodatnie wartości wskaźnika SPI wskazują na większy opad niż mediana, zaś ujemne na mniejszy. Wprowadzony system klasyfikacji SPI (tab. 2) służy do zdefiniowania intensywności okresów dla każdej skali czasowej. Każdej pojawiającej się suszy odpowiada stała ujemna wartość wskaźnika SPI, która wynosi $-1,0$ lub mniej. Koniec suszy określa się w momencie, gdy wskaźnik przyjmuje wartość dodatnią. Zatem każdy okres suszy ma swój czas trwania, początek i koniec i intensywność w każdym okresie jej występowania. Wskaźnik SPI w postaci map jest używany operacyjnie do monitorowania warunków w Colorado od 1994 r. W Polsce wykorzystuje się go od 2000 r. do monitorowania suszy na Kujawach [Łabędzki 2002]. Zaletą wskaźnika SPI jest to, że może on być określony dla różnych kroków czasowych i dla różnych warunków klimatycznych. Ponadto może dostarczać informacje dla wczesnego ostrzeżenia o suszy i może być pomocnym w ocenie surowości suszy.

Tabela 2. Klasyfikacje susz wg wskaźnika standaryzowanego opadu (SPI)

Wartość SPI	Klasa suszy
$\leq - 2,00$	ekstremalna
-1,99 do -1,50	silna
-1,49 do -1,00	umiarkowana
0 do - 0,99	łagodna

Klimatyczny Bilans Wodny (KBW). Klimatyczny bilans wodny należy do kompleksowych wskaźników stopnia uwilgotnienia atmosfery i jest różnicą między sumą opadów a sumą ewapotranspiracji potencjalnej w okresie [Rojek 1994]. Uwzględnia on nie tylko opad atmosferyczny, ale i temperaturę, co decyduje o tym, że w porównaniu do SPI pełniej obrazuje warunki meteorologiczne [Dubicki i in. 2002].

Ewapotranspiracja potencjalna dla okresu letniego została obliczona wg wzoru Penmmana, natomiast dla okresu zimowego z temperaturami niższymi od 0°C wzorem Konstantinowa.

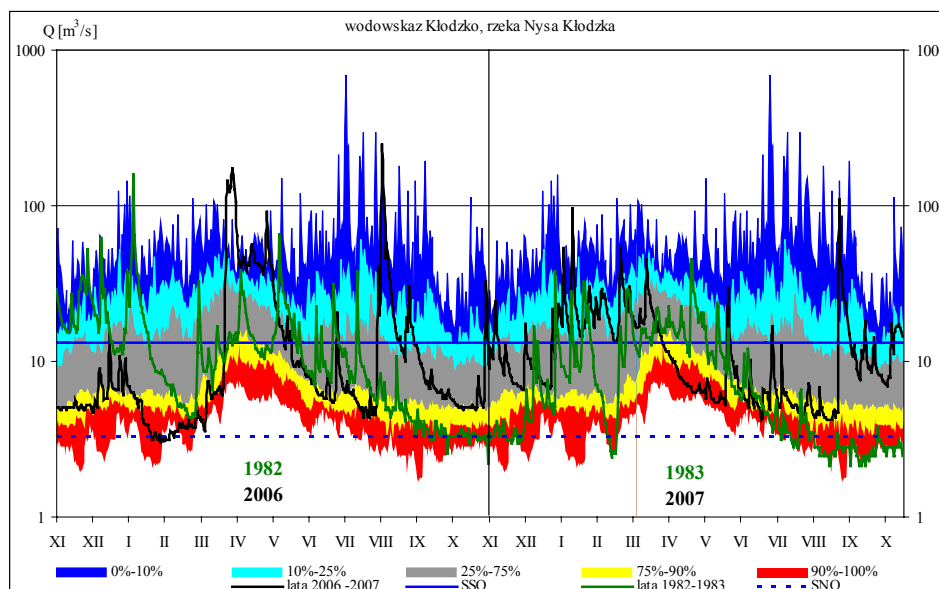
WYNIKI

Obliczenia zostały przeprowadzone dla obszaru zlewni górnej Nysy Kłodzkiej do wodowskazu w Kłodzku, dla wielolecia 1966-2005. Analizy zostały przeprowadzone na podstawie danych z 10 przekrojów wodowskazowych zlokalizowanych na Nysie Kłodzkiej (Międzylesie, Bystrzyca Kłodzka, Kłodzko) oraz na dopływach: Wilczym Potoku (Wilkanów), Bystrzycy (Bystrzyca Kłodzka), Białej Łądeckiej (Łądek Zdrój, Żelazno), Bystrzycy Dusznickiej (Szalejów Dolny) i Ścianwce (Tłumaczów, Gorzuchów) oraz z 11 stacji opadowych: Międzylesie, Bystrzyca Kłodzka, Kłodzko, Bielice, Ołdrzychowice Kłodzkie, Nowy Gierałtów, Stronie Śląskie, Polanica Zdrój, Chocieszów, Pasterka, Gajów.

Obszar badawczej zlewni jest zróżnicowany zarówno pod względem klimatycznym, hydrologicznym, jak i ukształtowania powierzchni oraz budowy geologicznej [Romera 1962; Tarka 1997]. W związku z tym określenie różnych wskaźników suszy pozwoli na ich porównanie oraz kompleksową ocenę występowania suszy o różnej intensywności.

Krzywe sum czasów trwania przepływów zostały opracowane dla wszystkich wodowskazów, dla badanego wielolecia, na które zostały naniesione codzienne przepływy z roku 2006 i 2007. W niniejszym artykule zamieszczono wykres sporządzony dla wodowskazu w Kłodzku jako zamykający cały obszar badawczy, rys. 4. Przebieg codziennych przepływów z lat suchych 2006 i 2007 roku (czarna linia na wykresie) wskazuje na to, że okres rok 2006 był suchy

i bardzo suchy z wyjątkiem okresu roztopowego (kwiecień i maj) oraz letniego (sierpień i początek września). Półrocze zimowe roku 2007 należało do przeciętnych, natomiast letnie do suchych i bardzo suchych, dopiero w jesieni nastąpił wzrost przepływów, co spowodowało, że okres ten można określić jako średni i mokry.



Rysunek 4. Krzywe sum czasów trwania przepływów dla wielolecia 1966–2005, przepływy codzienne z lat 1982–1983 oraz 2006–2007, wodowskaz Kłodzko, rzeka Nysa Kłodzka

We wszystkich analizowanych przypadkach lata 2006 i 2007 w przeważającej liczbie miesięcy zaliczyć można do suchych i bardzo suchych. Przepływy codzienne układały się przeważnie w strefie między SSQ a SNQ. W analizowanym wieloleciu ekstremalnie suchymi latami pod względem hydrologii były 1983 i 1984. W przekroju Kłodzko ekstremalna niżówka pod względem objętości niedoboru wystąpiła w 1983 r. i trwała pół roku (tab. 3).

Analiza okresów niżówkowych, które charakteryzują susze hydrologiczne przeprowadzona została na podstawie: niedoboru i czasu trwania niżówki ekstremalnej, wskaźnika niedoborów dynamicznych zasobów wodnych, intensywności niżówki ekstremalnej oraz liczby niżówek w wieloleciu z podziałem na klasy i sezony.

W tabeli 3 zestawiono parametry niżówek ekstremalnych, które wystąpiły w zlewni Nysy Kłodzkiej do przekroju wodowskazowego w Kłodzku, w wieloleciu 1966–2005. Wskaźnik niedoboru dynamicznych zasobów wodnych (D/A)

wyrażony jest w mm i mówi jaka warstwa wody w zlewni stanowi niedobór w okresie występującej niżówki. Intensywność niżówki (D/T) mówi o średniej objętości niedoboru w czasie trwania niżówki.

Tabela 3. Parametry niżówki ekstremalnej oraz wartości wskaźnika niedoboru dynamicznych zasobów wody (D/A), rzeka Nysa Kłodzka, wielolecie 1966–2005

Rzeka	Wodowskaz	Pow. zlewni A km ²	Nizówka ekstremalna Wielolecie 1966–2005					
			Niedobór D [tys. m ³]	Wskaźnik D/A mm	Intensywność D/T [tys. m ³]	Czas trwania niżówki		
						Liczba dni	Data początku	Data końca
Nysa Kłodzka	Międzylesie	49,7	2471,04	49,7	13,58	178	1983-05-29	1983-11-26
	Bystrzyca Kł	260	9562,75	36,8	68,31	137	1982-07-24	1982-12-10
	Kłodzko	1084	47473,34	43,8	302,38	157	1983-06-24	1983-11-27
Wilczy Potok	Wilkanów	35,1	2553,12	72,7	23,05	217	1983-07-02	1983-11-27
Bystrzyca	Bystrzyca	64	3902,69	61,0	23,94	157	1993-05-13	1993-10-22
Biała Lądecka	Lądek Zdrój	166	9839,23	59,3	63,89	153	1993-05-21	1993-10-21
	Żelazno	305	15170,11	49,7	96,62	155	1983-06-24	1983-11-27
Bystrzyca Dusznicka	Szalejów Dolny	175	4951,58	28,3	35,12	136	2004-06-22	2004-11-09
Ścinawka	Tłumaczów	256	10955,52	42,8	51,92	211	1983-06-18	1984-01-14
	Gorzuchów	511	16517,95	32,3	110,12	150	1992-07-09	1992-12-05

Wskaźnik niedoboru dynamicznych zasobów wodnych (D/A) jest obiektywnym parametrem porównywalnym dla różnych regionów. W zlewni Nysy Kłodzkiej kształtuje się on w granicach od 28,3 mm w zlewni Bystrzycy Dusznickiej do 72,7 mm w zlewni Wilczego Potoku.

Innym wskaźnikiem opisującym niedobory jest liczba dni niżówek wyrażona w %. W badanych zlewniach wynosi ona 27–28%, oznacza to że prawie 1/3 wszystkich dni w całym wieloleciu 1966–2005 stanowiły dni z niedoborem wody, z czego znaczna część przypada na okres letni.

Analizę czasu trwania okresów niżówkowych przeprowadzono na podstawie wydzielonych klas, tj. <10 dni, od 11–20 dni, od 21–30 dni oraz > 30 dni. Wszystkich okresów z niedoborem wystąpiło w badanych zlewniach od 100 do 165. W Nysie Kłodzkiej przeważały niżówki o czasie trwania od 11 do 20 dni, natomiast na odpływach o czasie trwania powyżej 30 dni.

Większość niżówek w zlewni Nysy Kłodzkiej wystąpiła w okresie letnim.

Tabela 4. Sumaryczna liczba niżówek w wieloleciu, w sezonie letnim i zimowym wyrażona w dniach i %, rzeka Nysa Kłodzka, wielolecie 1966–2005

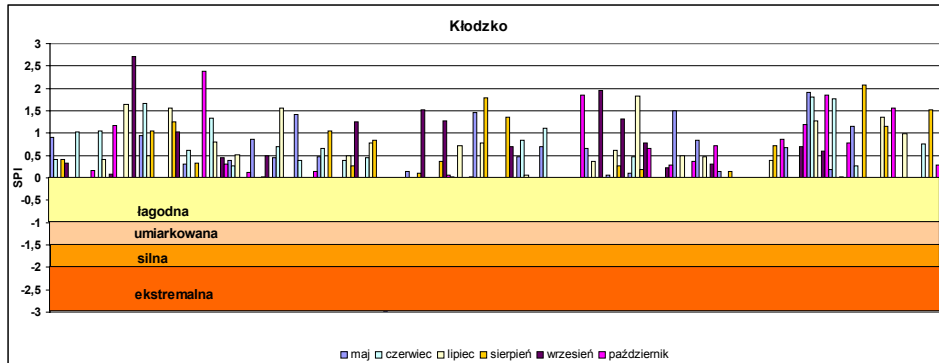
Wodowskaz	Rzeka	Liczba dni niżówek 1966-2005	Liczba dni niżówek %	Liczba dni niżówek letnich N_1	Liczba dni niżówek letnich %	Liczba dni niżówek zimowych N_2
Międzylesie	Nysa Kłodzka	3943	27	2950	75	993
Bystrzyca Kłodzka		4050	28	2791	69	1259
Kłodzko		4054	28	2525	62	1529
Wilkanów	Wilczy Potok	4036	28	2501	62	1535
Bystrzyca	Bystrzyca	4324	29	3052	71	1272
Lądek Zdrój	Biała Łądecka	3987	27	1834	46	2153
Żelazno		3964	27	1772	45	2192
Szalejów Dolny	Bystrzyca Dusznicka	4045	28	2915	72	1130
Tłumaczów	Ścinawka	4094	28	3305	82	789
Gorzuchów		4070	28	3003	74	1067

Tabela 5. Liczba niżówek w poszczególnych klasach w wieloleciu 1966–2005

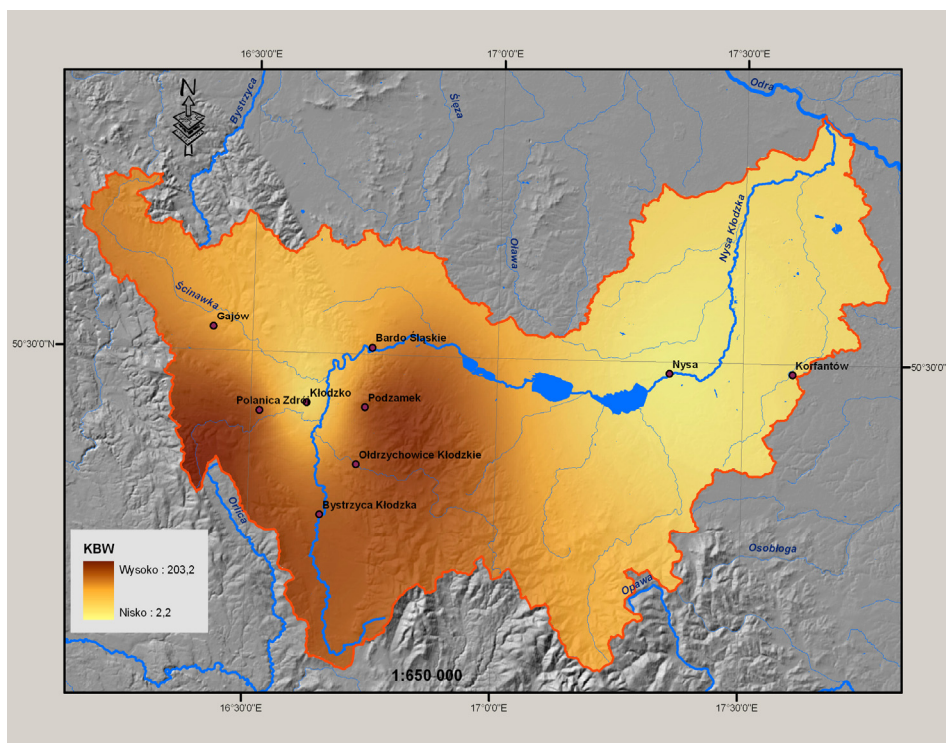
Posterunek	Rzeka	Liczba niżówek				
		ogółem	do 10 dni	od 11 do 20 dni	od 21 do 30 dni	ponad 30 dni
Międzylesie	Nysa Kłodzka	132	33	38	20	41
Bystrzyca Kłodzka		165	58	49	21	37
Kłodzko		138	40	44	15	39
Wilkanów	Wilczy Potok	125	29	37	17	42
Bystrzyca	Bystrzyca	116	19	35	15	47
Lądek Zdrój	Biała Łądecka	108	19	29	19	41
Żelazno		100	16	25	18	41
Szalejów Dolny	Bystrzyca Dusznicka	140	36	43	19	42
Tłumaczów	Ścinawka	108	23	35	15	35
Gorzuchów		106	17	36	18	35

Do wykrywania suszy i określenia jej nasilenia służy również wskaźnik standaryzowanego opadu SPI. Został on obliczony we wszystkich badanych posterunkach opadowych dla poszczególnych miesięcy półrocza letniego w wieloleciu 1966–2005. Przedstawienie SPI w formie graficznej, w postaci wykresu słupkowego, gdzie każdy miesiąc oznaczony jest innym kolorem pozwala w szybki i łatwy sposób wybrać miesiące, okresy dla których wartość SPI odpowiadała warunkom ekstremalnie suchym lub suchym. W przypadku Kłodz-

ka rok 1983 należał do suchych, a sierpień do ekstremalnie suchych, co miało potwierdzenie w postaci ekstremalnej niżówki.



Rysunek 5. Częstość występowania suszy wg wskaźnika SPI, posterunek Kłodzko, wielolecie 1966–2005 (wyk. Szalińska, Otop, IMGW O/Wrocław)



Rysunek 6. Rozkład KBW, zlewni Nysy Kłodzkiej, 1966-2005 [wyk. IMGW, projekt HYDROCARE 2007]

Wskaźnikiem niedoborów opadów, który uwzględnia również parowanie jest KBW. Został on wyznaczony dla wybranych stacji opadowych dla poszczególnych miesięcy. Roczne wartości KBW zawierają się w granicach od 2 mm do 163 mm. Zmienność czasowa warunków meteorologicznych powoduje, że KBW przyjmuje zarówno wartości dodatnie jak i ujemne. Maksymalna wartość KBW obserwowana była w 1977 r. w Odrzychowicach Kłodzkich i wynosiła +493 mm, minimalna zaś w 1990 w Kłodzku wynosiła -197 mm.

Średnie miesięczne wartości KBW zestawiono poniżej.

Tabela 6. Średnie miesięczne wartości KBW [mm] w wieloleciu 1966-2005 dla wybranych stacji z obszaru zlewni Nysy Kłodzkiej

Stacja	Wys. pol. m n.p.m	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI-IV	V-X
Kłodzko	360	11.2	9.2	5.8	-7.9	-15.6	0.9	-1.3	-15.7	-4.4	10.2	19.0	18.2	55.5	-25.8
Odrzychowice	340	18.1	19.0	14.2	2.3	-5.0	12.1	16.0	1.3	9.3	15.0	27.1	26.3	107.0	48.6
Podzamek	400	15.1	16.0	12.9	3.6	-1.8	14.0	24.3	-0.4	11.7	16.6	26.3	24.3	98.1	64.4
Bystrzyca Kłodzka.	365	31.4	25.8	20.7	1.3	-10.6	1.3	-0.1	-10.1	5.7	19.6	34.4	41.3	154.8	5.8
Polanica Zdrój	390	30.8	23.5	21.0	1.2	-12.9	4.6	6.6	-13.0	0.4	23.0	33.8	38.9	149.1	8.8
Gajów	400	22.0	17.2	17.2	-3.4	-7.9	-0.8	8.7	-13.1	-0.7	18.2	29.4	28.1	110.5	4.4

W okresie letnim, na stacji w Kłodzku, wartości ewapotranspiracji potencjalnej przewyższają zasilanie opadami atmosferycznymi. Na pozostałych stacjach opad nieznacznie przewyższa ETP. Największe nieodbory w całym obszarze badawczym występują w czerwcu i lipcu.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Stosowanie wskaźnikowej oceny suszy pozwala na łatwą interpretację wyników i umożliwia porównanie ich w regionach o różnych warunkach klimatycznych.

Przeprowadzone obliczenia dla obszaru zlewni Nysy Kłodzkiej są podstawą do porównania zastosowanych wskaźników pod względem dostępności danych, ilości danych wejściowych, łatwości rachunkowej oraz interpretacji wyników.

Przy stosowaniu wskaźników należy dobrać dane wejściowe z odpowiednim krokiem czasowym, tak by uwzględniały warunki wilgotnościowe nie tylko atmosfery, ale i podłoża.

Wskaźniki oparte tylko na czynnikach klimatycznych nie uwzględniają w pełni procesu rozwoju suszy. Zastosowanie tylko jednego elementu w postaci opadu jako danych wejściowych (SPI) odzwierciedla w zasadzie tylko jedną fazę – suszę atmosferyczną. Wprowadzenie drugiego czynnika w postaci parowania (KBW) daje pełniejszy obraz warunków meteorologicznych i wilgotnościowych obszaru.

Ocena suszy z zastosowaniem wskaźników bazujących na danych o przepływach stanowi podsumowanie rozwoju procesu suszy. Obserwowany odpływ jest wynikiem zachodzących procesów w zlewni.

Mając to wszystko na uwadze, należy stwierdzić, że ze względu na dostępność danych zarówno pod kątem długości serii obserwacyjnych, jak i zobrazowania przestrzennego stosowanie i interpretacja wskaźnika SPI jest najłatwiejsza. Mimo że przepływy najlepiej obrazują panujące stosunki wilgotnościowe w obszarze badawczym, to sieć wodowskazowa jest znacznie uboższa od sieci stacji opadowych. Należy również stwierdzić, że przedłużające się okresy suszy są identyfikowane pomimo stosowania różnych metod i wskaźników. Wskaźniki oceniające suszę stosujące różne kroki czasowe odnoszą się do różnych etapów rozwoju suszy.

BIBLIOGRAFIA

- Alley W. M. *The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions*. Journal of Climate and Applied Meteorology 23, 1984, s. 1100–1109.
- Changnon S. A. *Detecting Drought Conditions in Illinois*. Illinois State Survey Circular, 1987, s. 164–87.
- Chudowski R. *Wody podziemne Ziemi Kłodzkiej i możliwości ich wykorzystania*. Sesja Naukowa Zasoby Wodne Ziemi Kłodzkiej, Wydawnictwo PAN, Wrocław 1972.
- Dubicki A. pod red. *Zasoby wodne w dorzeczu Górnej i Środkowej Odry w warunkach suszy*. Wyd. IMGW, s. Atlasy i Monografie. Warszawa 2002.
- Gibbs, W.J.; and J.V. Maher. *Rainfall deciles as drought indicators*. Bureau of Meteorology Bulletin No. 48, Commonwealth of Australia, Melbourne 1967.
- Hisdal H., Tallaksen L. M. *Technical Report Nr 6*. Drought Event Definition, 2000.
- HYDROCARE (Hydrological cycle of the CADSES regions) Projekt EU Initiative Interreg III B Cadses, 2006–2007.
- Jakubowski W. *Rozkłady niżówki-program komputerowy*. 1997
- Kogan, F. N. *Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data*. Bulletin of the American Meteorological Society 76(5), 1995, s. 655–668.
- Łabędzki L., Bąk B. *Monitoring suszy za pomocą standaryzowanego opadu*. Woda-Środowisko- Obszary Wiejskie 2(5), 2002, 9–19.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, Kleist. 1993. *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, p. 179–184. January 17–22, Anaheim, California.
- Ozga-Zielińska M. *Niżówki i wezbrania – ich definiowanie i modelowanie*. Przegląd Geofizyczny, Rocznik XXXV, z.1–2, Warszawa 1990.
- Ozga-Zielińska M., Brzeziński J. *Hydrologia stosowana*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.

- Rojek M. *Time variability of climatic water balances in selected meteorological stations in Poland*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych z. 45, 1994.
- Radczuk L., Szarska O. *Ocena warunków zasilania Odry środkowej wodami gruntowymi*. Przegląd Geofizyczny, Rocznik XXXI, z. 2, PWN, Warszawa 1986.
- Romer E. *Wybór prac*, t. III, Wydawnictwo PAN, 1962.
- Shafer, B.A.; and L.E. Dezman. *Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas*. In Proceedings of the Western Snow Conference. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1982, s. 164–175.
- Tokarczyk T. *Zmienność przepływów niskich na obszarze Kotliny Kłodzkiej*, zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu, Inż. Środ. XII, nr 413, 2001.
- Tokarczyk T., Jakubowski W. *Temporal and spatial variability of drought In mountain catchemnts of Nysa Kłodzka basin*. IAHS Publication 308, ISSN 0144-7815, 2006, s. 139–144, Wallingford UK.
- Tate E., Gustard A. *Drought definition: a hydrological perspective* [In:] *Drought and Drought Mitigation in Europe*. Ed. by J.V. Vogt & F. Somm, ss. 23-48, Kliwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands. 2000.
- Tarka R. *Zasilanie wód podziemnych w górskich masywach krystalicznych na przykładzie Masywu Śnieżnika w Sudetach*. Prace geologiczno-mineralogiczne L VI, Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław 1997.
- Stahl K. *Hydrological Drought – a study across Europe*. PhD Thesis Albert-Ludwigs Universitaet Freiburg. Freiburger Schriften zur Hydrologie no 15, Freiburg, Germany, 2001.
- Zielińska M. *Niżówki letnie rzek polskich*. Gospodarka Wodna, Nr 3/62, 1962.
- Zielińska M. *Statystyczne metody opracowania niżówek*. Przegląd Geofizyczny, Rocznik IX, z. 2, Warszawa 1964.

dr inż. Tamara Tokarczyk
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Oddział we Wrocławiu
ul. Parkowa 30, 51-616 Wrocław
tel. (71) 32 00 220
e-mail: tamara.tokarczyk@imgw.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. Stanisław Czaban*