

ARKADIUSZ BARTCZAK¹, RYSZARD GLAZIK², SEBASTIAN TYSZKOWSKI¹

¹Institut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego
Polska Akademia Nauk w Toruniu

²Institut Geografii
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

IDENTYFIKACJA I OCENA INTENSYWNOŚCI OKRESÓW SUCHYCH WE WSCHODNIEJ CZĘŚCI KUJAW*

IDENTIFICATION AND EVALUATION OF THE INTENSITY
OF DRY PERIODS IN EASTERN PART OF KUJAWY

Streszczenie. Głównym celem artykułu była identyfikacja susz atmosferycznych i niżówek rzecznych oraz ocena ich intensywności na obszarze wschodniej części Kujaw. Do oceny susz atmosferycznych wykorzystano indeks standaryzowanego opadu (*SPI*). Analizy wykonano na podstawie danych z pięciu stacji opadowych: Izbica Kujawska, Chodecz, Duninów, Baruchowo i Gostynin. Z kolei niżówki rzeczne opisano parametrami takimi, jak: czas trwania, przepływ średni, przepływ minimalny oraz objętość niedoboru wody. Ocenę okresów niżówkowych przeprowadzono dla rzek: Zgłowiączka, Noteć Górna i Tażyna. Okres analiz obejmował wielolecie 1951-2010. Na badanym obszarze wyróżniono trzy charakterystyczne okresy, w których wystąpiły susze atmosferyczne o różnej intensywności oraz długotrwałe i głębokie niżówki rzeczne: 1) 1951-1959, 2) 1982-1994, 3) 2001-2008. Niżówki rzeczne powiązano z fluktuacjami, a także krótkookresowymi statystycznie istotnymi tendencjami malejącymi opadów. Najintensywniejsza susza atmosferyczna i hydrologiczna w badanym wieloleciu na obszarze wschodniej części Kujaw została odnotowana w latach 1989-1994. Na badanych ciekach pojawiły się najdłużej trwające niżówki (ponad 200 dni), w czasie których wystąpiły najniższe przepływy w rzekach odwadniających wschodnią część Kujaw. Również deficyt wody, jaki wystąpił podczas trwania tej suszy, był największy.

*Prezentowane wyniki są częścią pracy finansowanej ze środków na naukę Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2010-2013 jako projekt badawczy nr N N306 47 3538. Analizy były wykonane również przy wsparciu projektu ICLEA (*Virtual Institute of Integrated Climate and Landscape Evolution Analyses* within the *Helmholtz Association* – Wirtualny Instytut Zintegrowanych Analiz Ewolucji Klimatu i Krajobrazu w ramach Stowarzyszenia Helmholtza).

Słowa kluczowe: susze meteorologiczne, niżówki rzeczne, *SPI*, transformacja Boxa-Coxa, trend kroczący, Kujawy wschodnie

Wstęp

Obszary użytkowane rolniczo są szczególnie narażone na skutki występowania przyrodniczych zdarzeń ekstremalnych. Przez zdarzenia ekstremalne należy rozumieć przede wszystkim wezbrania i powodzie oraz długotrwałe i głębokie susze. W wielu pracach (SUSZA 1992... 1992, KOWALCZAK i IN. 1997, ŁABĘDZKI i BĄK 2002) występowanie okresów suchych określa się jako charakterystyczną cechę klimatu Polski. W definicji suszy, jaką podaje ŁABĘDZKI (2004), zawiera się stwierdzenie: „susza jest normalną, powtarzającą się cechą klimatu” (s. 48). Bezpośrednią przyczyną występowania okresów suchych jest niedobór lub brak opadów, a skutkiem susz jest zachwianie naturalnego bilansu wodnego (SUSZA 1992... 1992). Konsekwencje nieregularności zasilania związane ze zmienną wielkością i intensywnością opadów atmosferycznych w czasie (MICHALCZYK 2004) są widoczne przede wszystkim w wielkości i jakości upraw. FAL (2004), analizując wyjątkowe zdarzenia hydrologiczne pod kątem rodzaju ich występowania, stwierdza, że zainteresowanie badaczy bardziej skupia się na ekstremalnych wezbraniach, które powodują klęskę powodzi. Jej zdaniem „literatura poświęcona powodziom, przepływom maksymalnym oraz metodom ich obliczania jest niewspółmiernie większa od liczby prac poświęconych przepływom niskim” (s. 18). Taki stan może wynikać ze spektakularności, jakie wywołują nagle wezbrania i powodzie, w porównaniu z suszami. Susza jest procesem, który postępuje powoli, a następstwa, jakie wywołuje, są mniej widoczne, ale – co trzeba wyraźnie podkreślić – są one nie mniej kosztowne dla gospodarki i społeczeństwa niż powodzie (ŁABĘDZKI 2004).

Głównym celem pracy była identyfikacja i ocena intensywności susz atmosferycznych i niżówek rzecznych na obszarze intensywnie użytkowanym rolniczo i narażonym na deficyt wody (związany z małym zasilaniem opadami atmosferycznymi), jakim jest wschodnia część Kujaw. Ze względu na rolniczy charakter obszaru badań szczególny nacisk został położony na analizę susz atmosferycznych i niżówek rzecznych występujących w półroczu letnim (V-X). Niżówki rzeczne utożsamiane są często z suszą hydrologiczną i pojęcia te są stosowane zamiennie (TOKARCZYK 2010). Jest to uzasadnione, ponieważ często w badaniach hydrologicznych przyjmuje się założenie, że przepływy wody w rzece odzwierciedlają stan hydrometeorologiczny panujący w całej zlewni.

Proces rozwoju suszy

Susze hydrologiczne są skutkiem długotrwałych susz atmosferycznych, które z kolei są związane z zaleganiem nad określonym obszarem rozległych układów wysokiego ciśnienia (KUPCZYK 2005). Charakterystyczna dla układów wyżowych pogoda – słoneczna, upalna i bezdeszczowa powoduje uruchomienie samogenerującego się procesu formowania suszy. Proces ten, zdaniem BOBIŃSKIEGO i MEYERA (1992 a, 1992 b), rozpoczyna się zmniejszonym parowaniem terenowym wynikającym z braku wody. To z kolei powoduje zmniejszenie wilgotności względnej powietrza nad danym obsza-

rem, a prawdopodobieństwo nasycenia go wilgocią, a następnie kondensacja pary wodnej i wystąpienie opadu w takich warunkach są małe. Proces ten może przerwać jedynie zmiana typu cyrkulacji powietrza, tj. napływ wilgotnej masy powietrza nad obszar objęty suszą. Susze hydrologiczne nie są zjawiskiem wyjątkowym (FAL 2004) i charakterystycznym jedynie dla okresu pomiarów instrumentalnych, bowiem od najdawniejszych czasów, ujętych w opisach kronikarskich, znaleźć można informacje dotyczące tych zdarzeń (GIRGUŚ i STRUPCZEWSKI 1965, FAL 2004, LORENC i IN. 2008, ILNICKI i IN. 2012). Syntetyczne zestawienie dotyczące pojawiania się susz w Polsce w latach 1891-1995 przedstawiono w pracy MAGERA i IN. (1999). W badanym okresie autorzy ci wydzielili 75 susz atmosferycznych, 24 lata z suszą hydrologiczną w zakresie wód powierzchniowych i 17 susz hydrologicznych w zakresie wód podziemnych. Wezbrania (okresy wilgotne) i niżówki (okresy suche) są, zdaniem JOKIELA (2008), „swoistymi okresami w życiu rzeki” (s. 102). Występowanie, czy też powtarzalność i intensywność tych zdarzeń są uzależnione przede wszystkim od sposobu zasilania rzeki i od warunków klimatycznych. Susza, jako zjawisko odzwierciedlające naturalną zmienność klimatyczną, rozwija się w kilku etapach:

- 1) susza atmosferyczna – spowodowana niedostateczną ilością lub brakiem opadów przy jednoczesnym wystąpieniu wysokiej temperatury powietrza,
- 2) susza glebowa – w wyniku utrzymywania się suszy atmosferycznej następuje szybkie zmniejszenie się wilgoci w glebie, pogłębiane dodatkowo przez rośliny będące w okresie wegetacji,
- 3) susza hydrologiczna – dalsze przedłużanie się okresu bezopadowego może doprowadzić do wyraźnego ograniczenia zasobów wód podziemnych, co powoduje redukcję zasilania podziemnego, obniżenie zwierciadła wód podziemnych oraz zahamowanie zasilania cieków przez wody podziemne, a tym samym obniżanie się poziomu i przepływu wód powierzchniowych.

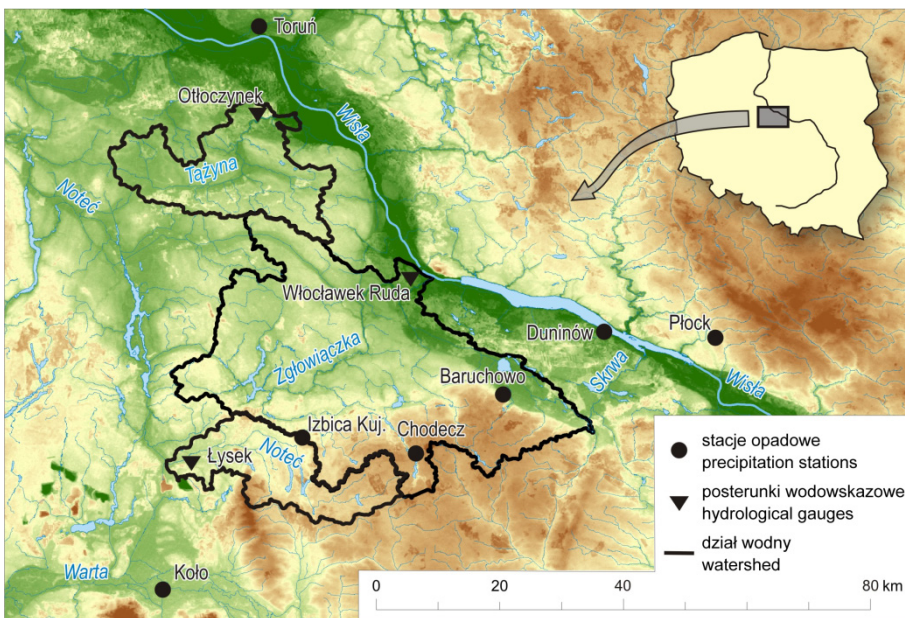
Ostatnią fazę, tj. suszę hydrologiczną, przerwać mogą bardzo intensywne opady lub śnieżna i długotrwała zima (DĘBSKI 1952). Jeśli w tym czasie nie zostaną uzupełnione zasoby wód podziemnych, susza hydrologiczna może wystąpić w kolejnym roku hydrologicznym (BOBIŃSKI i MEYER 1992 a, 1992 b).

Końcowym stanem, będącym wypadkową, czy raczej skutkiem, wymienionych powyżej etapów, rozważanym na poziomie badań ekonomicznych czy gospodarczych, jest susza w sensie ekonomiczno-gospodarczym. Brak wody powoduje ewidentne straty w gospodarce, a na terenach rolniczych – w produkcji rolniczej.

Obszar badań i dane

Detekcję okresów suchych wykonano na podstawie miesięcznych sum opadów atmosferycznych z pięciu stacji opadowych: Chodecz (dane z okresu 1952-2010), Baruchowo (dane z okresu 1951-2010), Gostynin (dane z okresu 1955-2004), Izbica Kujawska (dane z okresu 1951-2010) i Duninów (dane z okresu 1957-2010). Z kolei podstawą do identyfikacji i oceny niżówek rzecznych były dobowe wartości przepływów rzek Zgłowiączki (profil Włocławek Ruda, dane z okresu 1951-2010), Tążyny (profil Otłoczynek, dane z okresu 1965-2010) i Noteci Górnej (profil Łysek, dane z okresu 1965-

-2007). Pod względem hydrograficznym zlewnie Zgłowiączki i Tażyny należą do systemu rzecznej Wisły – są jej bezpośrednimi lewobrzeżnymi dopływami, natomiast zlewnia Noteci należy do systemu rzecznej Odry. Wszystkie posterunki opadowe oraz analizowane zlewnie są zlokalizowane w centralnej Polsce, we wschodniej części Kujaw (rys. 1). Pomimo że zlewnie należą do dwóch różnych systemów rzecznych, różnią się wielkością oraz innymi parametrami, to łączy je jedna cecha (tab. 1): od wieków ich krajobraz był zmieniany przez człowieka i dostosowywany do jego potrzeb. Wiązało się to przede wszystkim z rozwojem rolnictwa na tych terenach (podobnie zresztą jak w zachodniej części Kujaw i Wielkopolsce) (WODZICZKO 1947, LAMBOR 1954, 1956, ŻURAWSKI 1971, 1972).



Rys. 1. Położenie obszaru badań oraz rozmieszczenie stacji opadowych i posterunków wodowskazowych

Fig. 1. Research area and location of precipitation stations and hydrological gauges

Obecnie obszar badań jest intensywnie wykorzystywany rolniczo, świadczy o tym chociażby struktura użytkowania gruntów w największej analizowanej zlewni – w zlewni Zgłowiączki. Użytki rolne zajmują tam powierzchnię 1198,0 km², tj. około 80% całkowitej powierzchni zlewni. W strukturze użytków rolnych dominują grunty orne, które w ogólnej powierzchni dorzecza stanowią około 73% (1097,3 km²), natomiast udział użytków zielonych wynosi 6,7% (100,7 km²). Powierzchnia zajęta przez las wynosi około 127 km², co w ogólnej powierzchni dorzecza stanowi jedynie 8,5%.

Wszystkie obliczenia zostały oparte na danych pochodzących z sieci monitoringuowej IMGW w Warszawie.

Tabela 1. Charakterystyka analizowanych cieków i ich zlewni
 Table 1. Characteristics of the analysed watercourses and their catchment areas

Rzeka River	Po- wierzchnia Area (km ²)	$Q_{\text{śred}}$ Average discharge (m ³ ·s ⁻¹)	Q_{max} Maximum discharge (m ³ ·s ⁻¹)	Q_{min} Minimum discharge (m ³ ·s ⁻¹)	$SNQ_{(v,x)}$ (m ³ ·s ⁻¹)	Grunty orne Arable land (%)	Użytki zielone Grassland and pas- tureland (%)	Lasy Forests (%)	Inne Other (%)
Zgłowiączka 1951-2000	1 495,6	3,64	62,2	0,16	0,70	78,6	8,1	9,3	4,0
Noteć Górna 1965-2007	306,0	0,87	10,7	0,001	0,20	72,8	6,3	13,5	7,4
Tażyna 1965-2010	487,0	0,79	44,7	0,004	0,20	77,8	5,7	14,7	1,8

Metodyka identyfikacji i oceny susz meteorologicznych

Syntetyczne zestawienie wskaźników oceny intensywności suszy stosowanych w Polsce i na świecie przedstawiła TOKARCZYK (2008, 2010). Jednym z popularniejszych wskaźników służących do detekcji okresów suchych i oceny ich intensywności jest standaryzowany wskaźnik opadu *SPI* (ang. *Standardised Precipitation Index*). Zdaniem ŁABĘDZKIEGO i BAKA (2002) indeks ten jest „jednym z wielu obiektywnych kryteriów ewaluacji suszy” (s. 10). Podstawą do określenia wskaźnika *SPI* są długie szeregi czasowe opadów atmosferycznych dla wybranych okresów, np. 3-, 6-, 12-, 24-, 48-miesięcznych lub innych, np. sezonowych (okres wegetacyjny) lub półrocznych. MCKEE i IN. (1993) jako jedną z cech indeksu podają możliwość jego wykorzystania również do innych charakterystyk hydroklimatycznych, np. przepływów rzecznych, pokrywy śnieżnej, wilgotności gleby, poziomu wody gruntowej itp. Ponadto wskaźnik ten daje możliwość porównania ze sobą badanych charakterystyk w obrębie tego samego klimatu oraz tych samych charakterystyk w różnych strefach klimatycznych. Jest on rekomendowany przez polską służbę hydrologiczno-meteorologiczną (IMGW) jako wskaźnik monitorowania suszy. Jest on powszechnie wykorzystywany do identyfikacji i oceny natężenia suszy m.in. w Polsce (BAK i ŁABĘDZKI 2002, 2003, ŁABĘDZKI 2004, 2007, ŁABĘDZKI i IN. 2008), w Niemczech (KHADR i IN. 2009), na Sycylii (BONACCORSO i IN. 2003), w Portugalii (COSTA 2011), w Grecji (KARAVITIS i IN. 2011), w USA (MCKEE i IN. 1993, GUTTMAN 1999), w Bangladeszu (JAHANGIR ALAM i IN. 2013). W literaturze spotkać można różne metody obliczania wskaźnika *SPI*, jednak najczęściej stosowane są dwie metody.

Pierwsza polega na określeniu parametrów rozkładu prawdopodobieństwa metodą największej wiarygodności. Następnie oblicza się prawdopodobieństwo nieprzekroczenia sum opadów w ciągu dla tego rozkładu. Ostatecznie oblicza się dla tych prawdopodobieństw wartości zmiennej o rozkładzie normalnym standaryzowanym (ŁABĘDZKI 2006).

Druga metoda polega na doborze odpowiedniej funkcji przekształcającej szereg opadów do rozkładu zbliżonego do rozkładu normalnego lub zgodnego z nim. Zdaniem ŁABĘDZKIEGO i BAŁKA (2002) oraz ŁABĘDZKIEGO i IN. (2008) najlepszymi funkcjami transformującymi szeregi do rozkładu normalnego to: dla sum miesięcznych – $\sqrt[3]{P}$ lub $\ln P$, a dla sum dekadowych – $\sqrt[3]{P}$, $\sqrt[3]{(P+1)}$, $\sqrt[3]{(P+10)}$ lub $\ln P$.

Pośród wielu metod transformacji szeregów do rozkładu zbliżonego do rozkładu normalnego lub zgodnego z nim na potrzeby opracowania wybrano metodę Boxa-Coxa (BOX i COX 1964, 1982, SAKIA 1992), która ma postać:

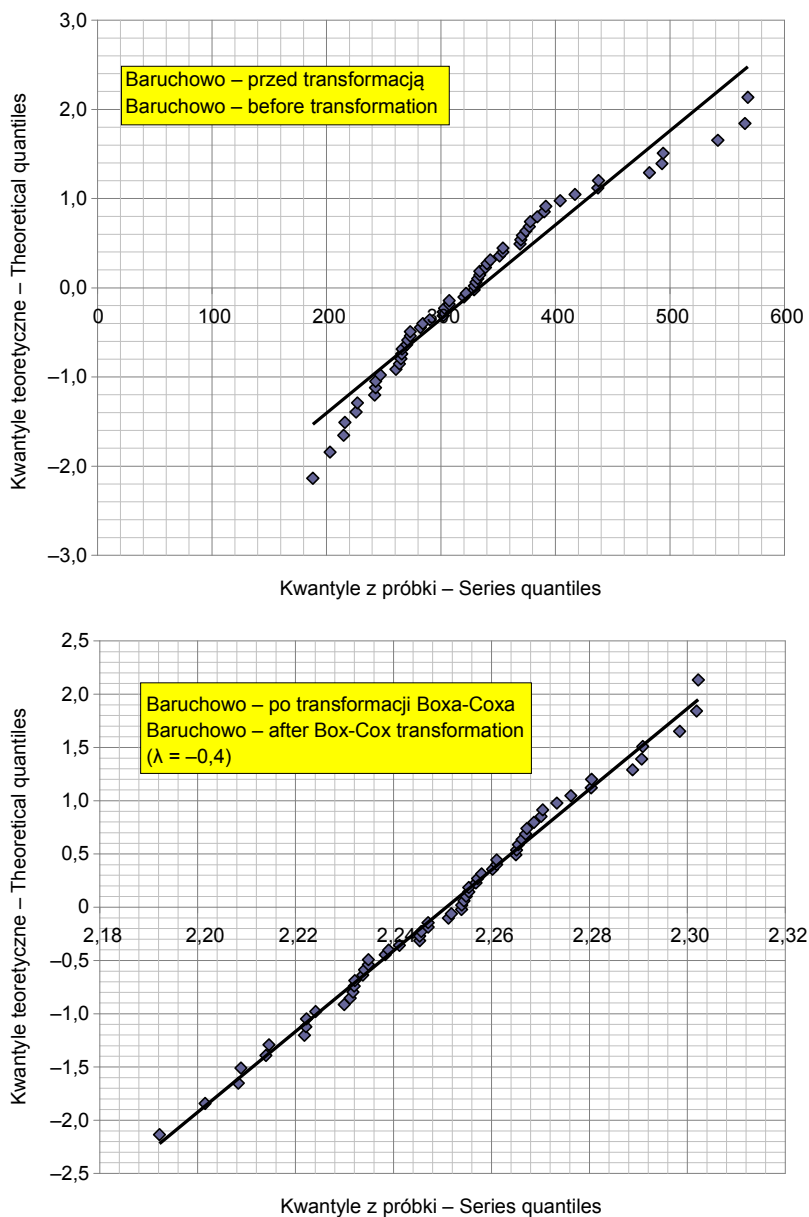
$$y^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} & (\lambda \neq 0) \\ \ln x & (\lambda = 0) \end{cases}$$

Jak można zauważyć, powyższa transformacja jest transformacją potęgową lub logarytmiczną. Jest ona prawdziwa, jeśli każdy element szeregu jest większy od zera. Warunek ten można obejść, stosując np. odpowiednie przesunięcie danych. W transformacji tej poszukujemy takiego parametru λ , żeby po transformacji z tym parametrem rozkład empiryczny najlepiej przybliżał rozkład typu normalnego. Metodycznie znajdujemy ten parametr, sprawdzając, dla jakiego λ współczynnik korelacji kwantyli rozkładu szeregu po transformacji z kwantylami rozkładu normalnego jest największy. Teoretycznie parametr λ może przyjąć wartości dowolnego znaku, z tego też względu należy przyjąć, iż transformacja szeregu w kierunku rozkładu normalnego nie zależy od kierunku skośności. Na rysunku 2 przedstawiono wybrane przekształcenia szeregu opadów atmosferycznych. Regułą wykresu kwantylowego jest to, że jeżeli obserwacje (dane) pochodzą z rozkładu normalnego, to punkty układają się wzdłuż prostej. Bardzo często transformacje powodują jednocześnie wyrównanie i stałość wariancji w przetransformowanych szeregach. Poprzez stałość wariancji należy rozumieć, że jest ona niezależna od wartości obserwacji i długości szeregu (HOYLE 1973), co oznacza, że szeregi mają stałą wariancję w odniesieniu do zmieniającej się średniej. Powyżej opisana metoda transformacji szeregów do postaci zgodnej z rozkładem normalnym na potrzeby wyznaczenia wskaźnika *SPI* nie była do tej pory stosowana i opisywana w polskiej literaturze tematu.

W następnej kolejności dokonano standaryzacji, która jest również pewnego rodzaju liniowym przekształceniem szeregu o rozkładzie w przybliżeniu zgodnym lub zgodnym z rozkładem typu normalnego $y \sim N(m, \sigma^2)$. Przed standaryzacją średnia szeregu może przyjmować dowolną wartość, podobnie jak odchylenie standardowe ($\sigma > 0$). Stąd wynika, że cała „rodzina” rozkładów normalnych może zawierać w sobie nieskończoną liczbę rozkładów normalnych. Wynikiem standaryzacji jest uzyskanie szeregu o średniej wynoszącej 0 i odchyleniu standardowym o wartości 1. Inaczej mówiąc, standaryzacja umożliwia nam porównanie ze sobą wielu szeregów o różniących się danych wejściowych – tak pod kątem ich skali, jak i jednostki pomiarowej.

Przekształcenie to ma postać:

$$\frac{y - \bar{y}}{\sigma_y} \sim N(0,1)$$



Rys. 2. Wykres kwantylowy dla rozkładu normalnego szeregu sum opadów atmosferycznych z półrocza letniego w Baruchowie przed transformacją i po transformacji Boxa-Coxa

Fig. 2. Q-Q plot for the normal distribution of series of summer half-year precipitation in Baruchowo before and after Box-Cox transformation

Cały opisany powyżej proces normalizacji i standaryzacji szeregów doprowadził do możliwości dokonania identyfikacji okresów suchych. Identyfikacja okresów następuje według określonego schematu. Dodatkowo wartości *SPI* oznaczają opady większe od wartości średniej, a ujemne wartości *SPI* oznaczają opady mniejsze od wartości średniej. MCKEE i IN. (1993) zaproponowali, aby za okres suchy uznać już wartości szeregu po normalizacji i standaryzacji mieszczące się w klasie od 0,0 do $-0,99$. Suszę taką nazwali suszą łagodną. W późniejszych opracowaniach, m.in. GUTTMANA (1999), klasyfikacja okresów suchych była prowadzona od wartości *SPI* wynoszącej $-1,00$. Z kolei BĄK i ŁABĘDZKI (2002) oraz ŁABĘDZKI (2006) wskazują na potrzebę modyfikacji tej klasyfikacji tak, aby wartością progową była wartość $-0,5$. Taką suszę nazywają łagodną (umiarkowaną). Uzasadniają tę zmianę faktem, że niedobór opadów, jaki wtedy występuje, może mieć znaczenie dla rozwoju roślin, szczególnie na obszarach rolniczych. Klasyfikację, jaką posłużono się w niniejszym opracowaniu, przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Klasyfikacja suszy wyrażonej współczynnikiem *SPI* (BĄK i ŁABĘDZKI 2002)
Table 2. Classification of a drought expressed with the *SPI* coefficient (BĄK and ŁABĘDZKI 2002)

Klasyfikacja <i>SPI</i> <i>SPI</i> classification	Rodzaj suszy Drought category
$-0,50$ - $-1,49$	Susza umiarkowana Moderate drought
$-1,50$ - $-1,99$	Susza silna Severe drought
$\leq -2,00$	Susza ekstremalna Extreme drought

Tendencje obliczonych wskaźników *SPI* przedstawiono za pomocą trendu kroczącego. Metoda ta jest szczególnie użyteczna do analizy długich szeregów, które charakteryzują się nieregularnymi i licznymi zmianami kierunku tendencji rozwojowej. Wygładzanie szeregu polega na arbitralnym ustaleniu stałej wygładzania k ($k < n$), a następnie na szacowaniu parametrów strukturalnych liniowej funkcji trendu na podstawie kolejnych fragmentów szeregu o długości stałej k . Liczba segmentów w szeregu wynosi $n - k + 1$, np. dla szeregu składającego się z 60 wartości, przy stałej $k = 10$ lat, liczba segmentów wynosi 51, a przy stałej $k = 15$ lat liczba segmentów wynosi 46. Metoda ta została szczegółowo opisana i wykorzystana przez BARTCZAKA i IN. (2013) do oceny tendencji rocznych sum opadów atmosferycznych we wschodniej części Kujaw.

Metodyka identyfikacji i oceny susz hydrologicznych

Niżówką rzeczną nazywany jest okres, w którym przepływy rzeczne są równe przyjętemu przepływowi granicznemu lub niższe od niego i trwają przez określony czas (OZGA-ZIELIŃSKA 1963, 1964, 1990). Definicja ta zawiera w sobie dwa parametry, które wymagają szczególnego doprecyzowania.

Pierwszy z nich to sposób wyznaczenia przepływu granicznego. W literaturze przedmiotu przyjmuje się różnorodne sposoby (KANIECKI 1982, ZELENHASIC i SALVAI 1987, TALLAKSEN i IN. 1997, WRZESIŃSKI 1999, SMAKHTIN 2001, ZELENHASIC 2002, TOKARCZYK 2010). Dobór odpowiedniej metody identyfikacji niżówek jest problematyczny i subiektywny. W niniejszym opracowaniu autorzy posłużyli się metodą przepływu granicznego *TLM* (ang. *Threshold Level Method*). Za przepływ graniczny niżówki przyjęto średni z minimalnych przepływów miesięcznych z półrocza letniego ($Q_{GNL} = SNQ_{(V-X)}$). Dla porównania wyznaczono i zestawiono na rysunku 3 niżówki, dla których przepływem granicznym był:

- przepływ $Q_{90\%}$ odczytany z krzywej sum czasów trwania przepływów wraz z wyższymi z półrocza letniego ($Q_{GNL} = Q_{90\%(V-X)}$),
- przepływ $Q_{70\%}$ odczytany z krzywej sum czasów trwania przepływów wraz z wyższymi z półrocza letniego ($Q_{GNL} = Q_{70\%(V-X)}$).

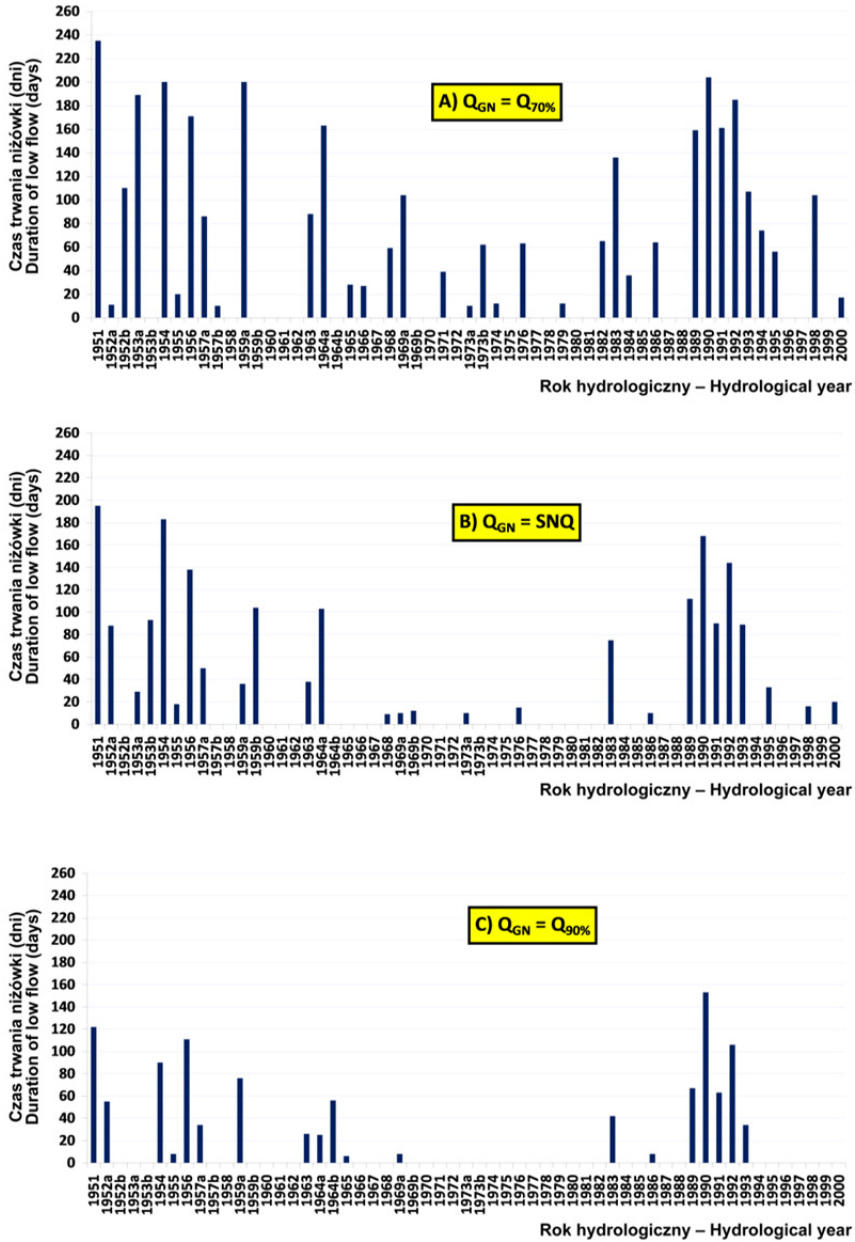
Krzywa sum czasów trwania, nazywana również krzywą kumulacyjną częstości przepływów (TOKARCZYK 2008), została skonstruowana na podstawie danych dobowych przepływów rzeki Zgłowiączki ze wszystkich półroczy letnich (V-X) wielolecia 1951-2000. Konstrukcja krzywej polega na uszeregowaniu wszystkich wartości przepływów dobowych w szeregu nierosnącym, a następnie obliczeniu skumulowanego udziału (procentowego) każdej wartości w szeregu. Ostatecznie znajdujemy wartość przepływu, która wraz z wyższymi przepływami stanowi odpowiedni (szukany) udział procentowy.

W niniejszej pracy przyjęto założenie, że niżówki są zdarzeniem wyjątkowym, a więc powinny pojawiać się lata lub ciągi lat, kiedy niżówki będą występowały bardzo rzadko lub nie będą w ogóle obserwowane (okresy wilgotne), oraz lata lub ciągi lat, kiedy niżówki pojawią się nawet kilka razy (okresy suszy), stąd też dobór przepływu granicznego wydaje się uzasadniony, gdyż jest on wypośrodkowany między skrajnymi liczbami wyróżnionych zdarzeń.

Bardzo często niżówki nie kończyły się w październiku, wraz z końcem roku hydrologicznego, ale trwały do listopada lub nawet grudnia, czyli do początkowych miesięcy półrocza zimowego kolejnego roku hydrologicznego. W takim przypadku nie dzielono sztucznie niżówek, lecz koniec niżówki określano wraz z dniem, kiedy faktycznie się ona skończyła, tj. kiedy przepływ przekroczył ustalony przepływ graniczny.

Drugim parametrem wymagającym doprecyzowania jest czas trwania niżówki. Za minimalny okres, w którym przepływy były równe Q_{GN} lub niższe, przyjęto 10 dni. Jeśli niżówka była przerywana przepływami wyższymi od przyjętego Q_{GN} i przerwy te nie były dłuższe niż 15 dni niżówki, to traktowano ją jako jedno zdarzenie. W innym przypadku traktowano niżówki i opisywano je jako zdarzenia oddzielne, pomimo że wystąpiły w tym samym roku hydrologicznym (na rysunkach takie zdarzenia oznaczano przy roku literami *a* lub *b*).

Dzięki tak przyjętym założeniom każde wydzielone zdarzenie można było opisać parametrami takimi, jak: czas trwania, przepływ średni, przepływ minimalny, a także najważniejszym parametrem hydrologicznym – objętością niedoboru wody w czasie trwania niżówki. Podstawą do wyznaczenia niżówek były dobowe wartości przepływów rzecznych.



Rys. 3. Liczba i czas trwania niżówek wyznaczonych za pomocą różnych poziomów odcięcia przepływu granicznego

Fig. 3. Number and duration of low flows established by means of various threshold levels of discharge

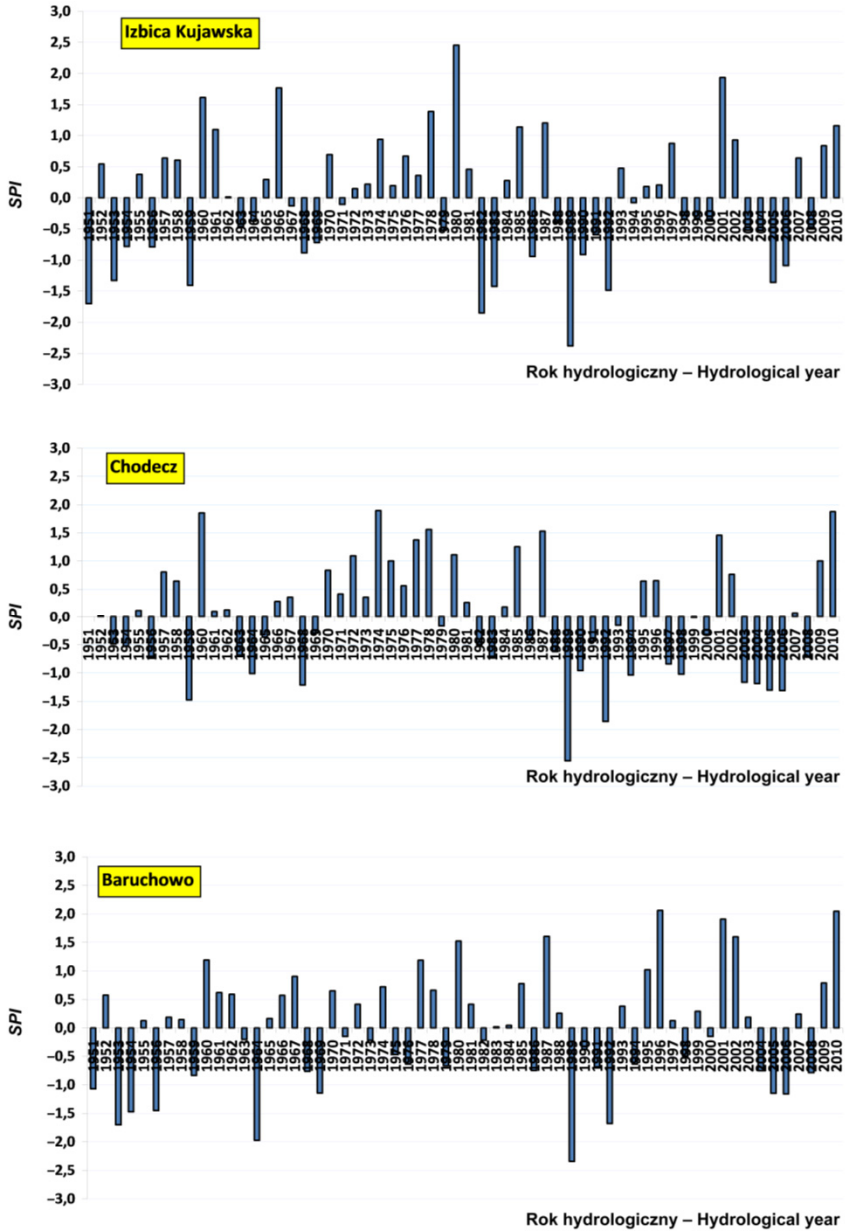
Od roku 2000 na rzece Zgłowiączce powyżej profilu pomiarowego Włocławek Ruda (w odległości 11,53 km) funkcjonuje Mała Elektrownia Wodna (MEW). Praca elektrowni powoduje wahania stanów wody i przepływów na całym odcinku rzeki pomiędzy elektrownią a ujściem Zgłowiączki do Wisły (BARTCZAK 2007). Wahania te są widoczne szczególnie w okresach suchych, kiedy występują okresowe braki wody. Przepływ wody w rzece jest zbyt mały, aby turbina wodna pracowała efektywnie. W związku z powyższym niżówki występujące na rzece Zgłowiączce po roku 2000 wyznaczono na podstawie daty początku i końca wahań stanów wody i przepływów, jakie wywołuje swoją pracą MEW. Niżówki takie opisano tylko czasem ich trwania. Nie wyznaczono innych parametrów opisanych powyżej.

Wyniki i dyskusja

Zgodnie z przyjętą klasyfikacją obliczonego wskaźnika standaryzowanego opadu *SPI* na badanym obszarze wyróżniono od 16 (Gostynin i Duninów) do 20 (Chodecz i Izbica Kujawska) półroczy letnich, w których wystąpiła susza o różnej intensywności (rys. 4). Częstotliwość (stosunek częstości występowania suszy do liczby lat) występowania półroczy letnich z suszą wynosi zatem od 30% do 34% (tab. 3). Podobne wyniki (29%) uzyskali ŁABĘDZKI i IN. (2008) dla całego obszaru Polski. Półroczy letnich charakteryzujących się suszą umiarkowaną było od 12 w Duninowie do 18 w Chodczu. Częstotliwość pojawiania się półroczy letnich z suszą umiarkowaną wynosiła od 22% (Duninów) do 30% (Chodecz). Z kolei częstotliwość występowania suszy silnej wynosiła od 2% (Chodecz i Gostynin) do 7% (Duninów), a suszy ekstremalnej – nie była większa niż 2% (Gostynin). Jak wykazali LORENC i IN. (2008) oraz ILNICKI i IN. (2012), susze w okresie od XVII do XVIII wieku na ziemiach polskich pojawiały się co 4-5 lat. W okresie 1951-1981 pojawiały się z częstotliwością co 5 lat, a już w okresie 1982-2008 – co 2 lata. Brak jednak w wymienionych publikacjach informacji o natężeniu wymienionych susz.

Tendencje obliczonych wartości *SPI* dla półroczy letnich na analizowanych postępkach opadowych we wschodniej części Kujaw przedstawiono na rysunku 5. Widoczna jest tendencja do grupowania się lat suchych w kilku- lub kilkunastoletnie okresy. Na analizowanym obszarze w wieloleciu 1951-2010 można wyróżnić trzy charakterystyczne okresy, w których wystąpiły susze atmosferyczne o różnej intensywności oraz długotrwałe i głębokie niżówki rzeczne.

1. Lata 1951-1959 – w okresie tym wystąpiło w Izbicy Kujawskiej 5 półroczy letnich o różnym natężeniu suszy (4 należały do kategorii suszy łagodnej i 1 do suszy silnej), również 5 półroczy letnich w Baruchowie (4 należały do kategorii suszy łagodnej i 1 do suszy silnej) oraz 3 półrocza letnie w Chodczu (wszystkie należały do kategorii suszy łagodnej). Lata, w których wystąpiły suche półrocza letnie, to 1951, 1953, 1954, 1956 i 1959. Niżówki na badanych rzekach w półroczach letnich nie wystąpiły jedynie w roku 1958. Zestawienie parametrów niżówek, jakie wystąpiły w półroczach letnich, przedstawiono tylko dla rzeki Zgłowiączki (tab. 4), ponieważ dane z pozostałych cieków pochodzą z okresu późniejszego. W okresie 1951-1959 wyróżniono 10 niżówek półroczy letnich, z czego w dwóch latach: 1953 i 1959 niżówki wystąpiły dwukrotnie. Niżówki rozpoczynały się w różnych miesiącach półrocza letniego, jednak



Rys. 4. Wartości *SPI* dla półroczy letnich na stacjach opadowych w Izbicy Kujawskiej, Chodczu i Baruchowie w latach 1951-2010

Fig. 4. Values of *SPI* for summer half-years at precipitation stations in Izbica Kujawska, Chodecz and Baruchowo in 1951-2010

Tabela 3. Liczba i częstotliwość występowania susz w półroczach letnich o różnej intensywności według wskaźnika suszy *SPI* we wschodniej części KujawTable 3. Number and frequency of occurrence of various-intensity drought events in summer half-years according to *SPI* in eastern Kujawy

Posterunek opadowy Precipitation station	Susza umiarkowana Moderate drought		Susza silna Severe drought		Susza ekstremalna Extreme drought		Łącznie Total	
	liczba number	częstotliwość frequency (%)	liczba number	częstotliwość frequency (%)	liczba number	częstotliwość frequency (%)	liczba number	częstotliwość frequency (%)
Baruchowo 1951-2010	15	25	3	5	1	2	19	32
Chodecz 1952-2010	18	30	1	2	1	2	20	34
Duninów 1957-2010	12	22	4	7	0	0	16	29
Gostynin 1955-2004	13	26	1	2	2	4	16	32
Izbica Kujawska 1951-2010	17	28	2	3	1	2	20	33

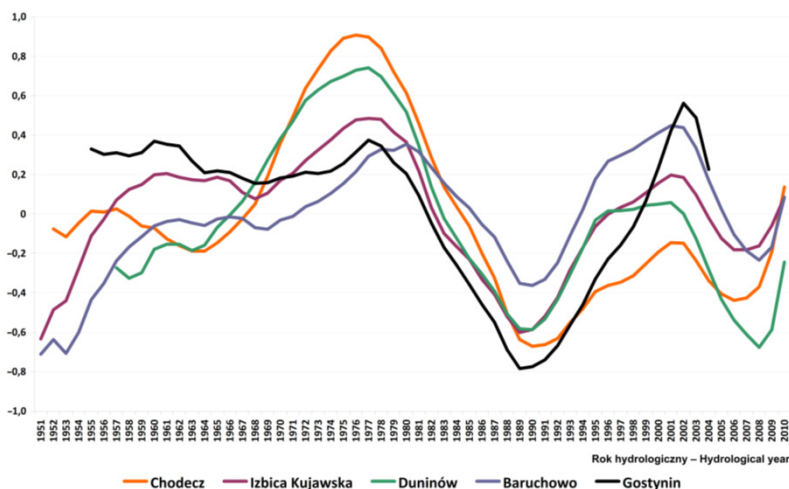
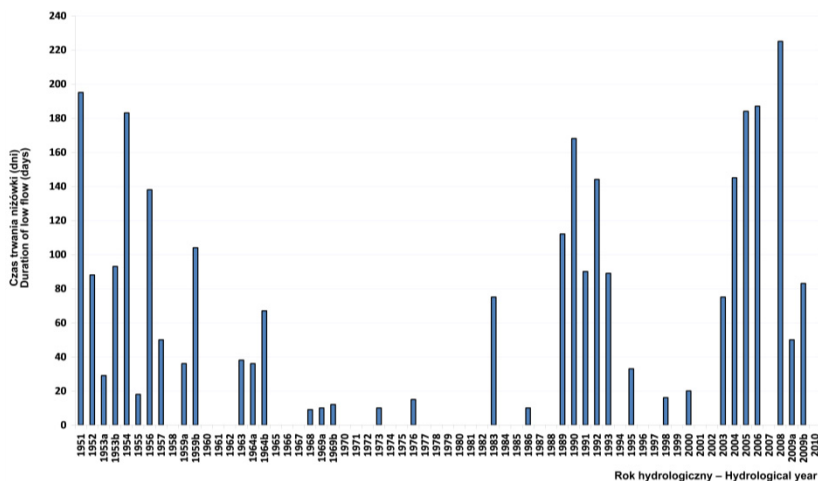
Rys. 5. Przebieg *SPI* dla półroczy letnich na analizowanych stacjach opadowych w latach 1951-2010Fig. 5. *SPI* trends for summer half-years at the analysed precipitation stations in 1951-2010

Tabela 4. Parametry wydzielonych okresów z niżówkami z lat 1951-1959, rzeka Zgłowiączka
 Table 4. Parameters of selected low flow periods for 1951-1959, the Zgłowiączka River

Lp. No.	Rok Year	Początek Onset	Koniec End	Czas trwania (dni) Duration (days)	$Q_{\text{śred}}$ Average discharge ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Q_{min} Minimum discharge ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Niedobór wody (tys. m^3) Volume of water deficit (thous. m^3)
1	1951	24 VI	4 I	195	0,41	0,17	4 892,8
2	1952	9 VII	4 X	88	0,45	0,31	1 867,1
3	1953a	17 VII	25 VIII	29	0,64	0,39	152,1
4	1953b	20 IX	31 XII	93	0,55	0,35	1 232,1
5	1954	25 VI	24 XII	183	0,44	0,20	4 034,0
6	1955	15 VIII	1 IX	18	0,52	0,39	276,5
7	1956	10 VII	5 XII	138	0,42	0,28	3 297,9
8	1957	13 VI	9 VIII	50	0,42	0,20	1 198,4
9	1959a	22 VI	29 VII	36	0,58	0,50	385,3
10	1959b	14 IX	22 XII	104	0,43	0,25	2 460,7

najczęściej (w czterech przypadkach) przepływy poniżej Q_{GN} rozpoczynały się w czerwcu, a w trzech przypadkach w lipcu. Najdłużej trwająca niżówka wystąpiła w półroczu letnim roku 1951 – trwała 195 dni (rys. 6), a niedobór wody, jaki wystąpił w czasie jej trwania, był również największy spośród wyróżnionych w tym okresie. Przepływ minimalny niżówki wynosił $0,17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i był drugim minimalnym przepływem w półroczach letnich w wieloleciu 1951-2010. W okresie tym wystąpiły dwie niżówki letnio-jesienne trwające ponad 150 dni. W całym wieloleciu 1951-2000 takie niżówki wystąpiły tylko trzy razy.

2. Lata 1982-1994 – w tym okresie wystąpiła wyraźna malejąca tendencja opadów w półroczu letnim w całej dekadzie lat osiemdziesiątych z minimum osiągniętym w latach 1989-1992 (rys. 5). W okresie tym na posterunku w Izbicy Kujawskiej wystąpiło 7 półroczy letnich z suszą o różnej intensywności (5 z suszą łagodną, 1 z suszą silną i 1 z suszą ekstremalną), na posterunku w Chodczu odnotowano 7 takich przypadków (5 z suszą łagodną, 1 z suszą silną i 1 z suszą ekstremalną), a na posterunku w Baruchowie – 5 takich półroczy letnich (3 z suszą łagodną, 1 z suszą silną i 1 z suszą ekstremalną). Praktycznie na wszystkich posterunkach półrocze letnie roku 1989 odnotowano jako ekstremalnie suche. Jedynie na posterunku w Duninowie półrocze letnie sklasyfikowano jako suszę silną. Sumy opadów z półrocza letniego zanotowane w Izbicy Kujawskiej wynosiły w roku 1989 166 mm, a w roku 1992 – 220 mm (średnia z lat 1951-2010 wynosiła 336 mm). Z kolei w Chodczu w półroczu letnim 1989 roku zanotowano w sumie 182 mm opadów, a w półroczu letnim 1991 roku – 176 mm (średnia z lat 1952-2010 wynosiła 351 mm). Również w Baruchowie w półroczach letnich zanotowano w sumie: 1989 roku – 189 mm opadu, w 1990 roku – 167 mm opadu, a w 1991



Rys. 6. Liczba i czas trwania niżówek półroczy letnich na rzece Zgłowiączce w latach 1951-2010

Fig. 6. Number and duration of low flows in summer half-years on the Zgłowiączka River in 1951-2010

roku – 177 mm opadu (średnia z lat 1951-2010 wynosiła 333 mm). Rok 1989 był początkowym rokiem suszy hydrologicznej, jaka wystąpiła na badanym obszarze i była skutkiem niedoboru opadów w latach poprzednich. Nawet wilgotne lata roku 1985 i 1987 nie wpłynęły na zmianę ogólnej tendencji opadów w tym okresie (rys. 5). Prawdopodobnie spowodowały jedynie chwilowe złagodzenie przebiegu suszy, lecz nie zlikwidowały niedoborów, jakie wystąpiły w latach 1982, 1983 i 1986. Zestawienie parametrów niżówek półroczy letnich, jakie wystąpiły na analizowanych ciekach w tym okresie, zestawiono w tabeli 5. Podczas trwania długotrwałych niżówek (rys. 6, 7, 8) wystąpiły najmniejsze przepływy rzeczne w analizowanych wieloletniach: $0,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (odpływ jednostkowy rzędu $0,11 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) na Zgłowiączce w roku 1990, $0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (odpływ jednostkowy rzędu $0,003 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) na Noteci Górnej w roku 1992 czy $0,004 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (odpływ jednostkowy rzędu $0,01 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) na Tążynie w roku 1993. W półroczu letnim roku 1990 wystąpiły największe niedobory na analizowanym obszarze, np. niedobór wody w czasie wystąpienia 168-dniowej niżówki na Zgłowiączce wynosił $5\,020\,700 \text{ m}^3$ i był największy w całym badanym okresie. Również na Noteci Górnej, której zlewnia jest znacznie mniejsza od zlewni Zgłowiączki, niedobór wody był bardzo duży i wynosił aż $2\,929\,000 \text{ m}^3$.

3. Lata 2001-2008 – w okresie tym, podobnie jak w poprzednim, widoczna jest wyraźna tendencja malejąca opadów (rys. 5). Charakterystyczny jest ciąg lat 2003-2006, w których w większości półrocza letnie zakwalifikowano jako susze atmosferyczne łagodne (rys. 4). Również półrocze letnie roku 2008 należało określić jako suszę łagodną. W przypadku niżówek, jakie wystąpiły na rzece Zgłowiączce, niestety, nie jest możliwe porównanie ich z innymi ciekami ze względu na konieczność zastosowania innego sposobu ich wydzielenia. Widoczna jest zgodność lat, w których wystąpiły susze atmosferyczne i niżówki rzeczne. W okresie tym susze atmosferyczne należały do typu

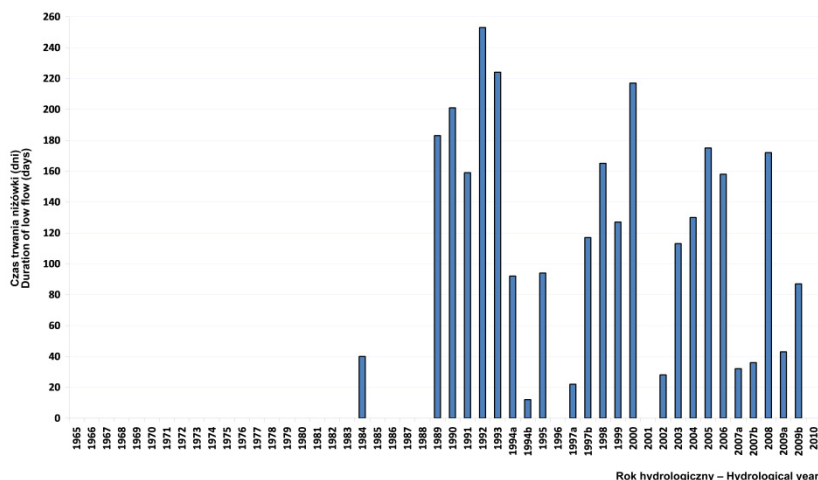
Tabela 5. Parametry wydzielonych okresów z niżówkami z lat 1989-1994, rzeki: Zgłowiączka, Noteć Górna i Tążyzna

Table 5. Parameters of selected low flow periods for 1989-1994, the Zgłowiączka River, Noteć Górna River and Tążyzna River

Rok Year	Rzeka River	Początek Onset	Koniec End	Czas trwania (dni) Duration (days)	$Q_{\text{śred}}$ Average discharge ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Q_{min} Minimum discharge ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Niedobór wody (tys. m^3) Volume of water deficit (thous. m^3)
1989	Zgłowiączka	11 VIII	10 XII	112	0,50	0,31	1 948,3
	Noteć Górna	24 VI	15 XII	175	0,07	0,01	2 013,1
	Tążyzna	7 VI	15 XII	183	0,14	0,09	911,5
1990	Zgłowiączka	15 V	31 X	168	0,35	0,16	5 020,7
	Noteć Górna	11 V	12 XII	216	0,04	0,003	2 929,0
	Tążyzna	5 IV	31 X	201	0,13	0,09	1 130,1
1991	Zgłowiączka	2 VIII	1 XI	90	0,49	0,28	1 726,3
	Noteć Górna	10 V	11 XII	216	0,11	0,05	1 676,2
	Tążyzna	13 VII	20 XII	159	0,11	0,07	1 204,4
1992	Zgłowiączka	13 VI	13 XI	144	0,41	0,22	3 551,9
	Noteć Górna	23 VI	7 I	199	0,10	0,001	1 800,6
	Tążyzna	17 V	24 I	253	0,06	0,006	3 087,3
1993	Zgłowiączka	4 VI	8 IX	89	0,52	0,29	1 354,8
	Noteć Górna	20 V	4 XI	167	0,15	0,10	759,5
	Tążyzna	24 IV	3 XII	224	0,09	0,004	2 196,4
1994	Zgłowiączka	Niżówka nie wystąpiła – Low flow did not occur					
	Noteć Górna	6 VII	28 X	115	0,11	0,05	902,0
	Tążyzna	a 4 VII	9 X	92	0,13	0,08	526,2
b 4 XI		15 XI	12	0,16	0,16	12,1	

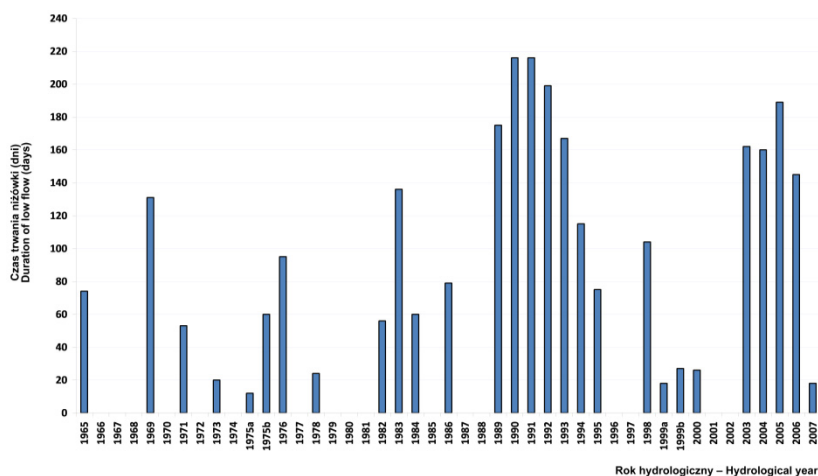
łagodnych, a niżówki, jakie wyróżniono na badanych ciekach, miały jedną wspólną cechę: rozpoczynały się w większości już w czerwcu lub w pierwszej połowie lipca i były długotrwałe (tab. 6). Czas uzupełniania zasobów wody w zlewni był bardzo długi. Niżówki kończyły się często w grudniu, a niekiedy nawet w styczniu (rok 2005). Niedobory wody, jakie wystąpiły w czasie ich trwania, nie były tak duże, jak w okresie poprzednim (1982-1994).

Powyższa analiza pokazała wyraźną analogię terminów występowania półroczy letnich, w których wystąpiły susze atmosferyczne o różnej intensywności, z okresami występowania niżówek letnich i letnio-jesiennych. Świadczy to o szybkiej reakcji analizowanych zlewni na spadek zasilania opadami atmosferycznymi. Przyczyny występo-



Rys. 7. Liczba i czas trwania niżówek półroczy letnich na rzece Tążynie w latach 1965-2010

Fig. 7. Number and duration of low flows in summer half-years on the Tążyna River in 1965-2010



Rys. 8. Liczba i czas trwania niżówek półroczy letnich na rzece Noteć Górnej w latach 1965-2007

Fig. 8. Number and duration of low flows in summer half-years on the Noteć Górna River in 1965-2007

wania kilku- bądź kilkunastoletnich okresów z utrzymującymi się niskimi przepływami należy zatem wiązać z fluktuacjami, a także krótkookresowymi statystycznie istotnymi tendencjami opadów, które, zdaniem BARTCZAKA i IN. (2013), mają większe znaczenie aniżeli ich tendencje wieloletnie. Pewne przesunięcia bądź różny czas trwania niżówek

Tabela 6. Parametry wydzielonych okresów z niżówkami z lat 2003-2009, rzeki: Zgłowiączka, Noteć Górna i Tążyzna

Table 6. Parameters of selected low flow periods for 2003-2009, the Zgłowiączka River, Noteć Górna River and Tążyzna River

Rok Year	Rzeka River	Początek Onset	Koniec End	Czas trwania (dni) Duration (days)	$Q_{\text{śred}}$ Average discharge ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Q_{min} Minimum discharge ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Niedobór wody (tys. m^3) Volume of water deficit (thous. m^3)
2003	Zgłowiączka	21 VIII	4 XI	75	–	–	–
	Noteć Górna	25 VI	11 XII	162	0,13	0,027	1 367,7
	Tążyzna	16 VI	27 X	113	0,17	0,13	260,06
2004	Zgłowiączka	30 VII	21 XII	145	–	–	–
	Noteć Górna	19 VII	25 XII	160	0,08	0,038	1 618,3
	Tążyzna	25 VI	15 XI	130	0,13	0,06	808,7
2005	Zgłowiączka	4 VII	3 I	184	–	–	–
	Noteć Górna	15 VII	19 I	189	0,10	0,042	1 620,9
	Tążyzna	29 VI	20 XII	175	0,08	0,05	1 766,02
2006	Zgłowiączka	25 VI	28 XII	187	–	–	–
	Noteć Górna	3 VII	24 XI	145	0,13	0,05	922,8
	Tążyzna	28 VI	2 XII	158	0,12	0,03	1 158,28
2007	Zgłowiączka	Niżówka nie wystąpiła – Low flow did not occur					
	Noteć Górna	16 VI	3 VII	18	0,16	0,14	64,8
	Tążyzna	a 5 VI	6 VII	32	0,17	0,15	85,5
b 28 IX		4 XI	36	0,18	0,17	55,3	
2008	Zgłowiączka	10 VI	20 I	225	–	–	–
	Noteć Górna	b.d. – no data	b.d. – no data	b.d. – no data	b.d. – no data	b.d. – no data	b.d. – no data
	Tążyzna	3 VIII	21 XI	172	0,09	0,04	1 669,3
2009	Zgłowiączka	13 V 24 VIII	1 VII 14 XI	50 83	–	–	–
	Noteć Górna	b.d. – no data	b.d. – no data	b.d. – no data	b.d. – no data	b.d. – no data	b.d. – no data
	Tążyzna	a 19 IV	31 V	43	0,13	0,10	257,5
b 21 VIII		19 XI	87	0,13	0,07	556,4	

w zależności od wystąpienia suszy atmosferycznej o tej samej intensywności wynika przede wszystkim ze stanu oraz możliwości retencyjnych zlewni. Związek korelacyjny pomiędzy szeregami rocznych sum opadów atmosferycznych na analizowanym obsza-

rze był istotny statystycznie (BARTCZAK i IN. 2013). Widoczna jest również zgodność pomiędzy kierunkami tendencji opadów na wszystkich badanych posterunkach. Należy więc wnosić, że opady na tym obszarze są kształtowane przez te same masy powietrza. Wnioski, jakie wynikają z przeprowadzonej analizy, są zbieżne z wnioskami, jakie zostały zawarte w pracy ILNICKIEGO i IN. (2012) dotyczącej obiegu wody w Wielkopolsce. W pracy tej wykazano, że elementy klimatyczne, przepływy wód oraz stany wód gruntowych na obszarze Wielkopolski podlegają cyklicznym zmianom, a nie wieloletnim istotnym statystycznie trendom.

Wnioski

1. Zastosowana metoda wskaźnikowa (*SPI*) pozwoliła na stosunkowo prostą identyfikację i jednocześnie ocenę suszy pod kątem jej intensywności w odpowiednich klasach.

2. W przypadku sum opadów w półroczu letnim nie stwierdzono istotnych tendencji w całych okresach przyjętych do analizy, natomiast sumy opadów wykazywały znaczną zmienność z roku na rok oraz charakteryzowały się kilkuletnimi fluktuacjami w przebiegu wieloletnim.

3. Charakterystyczną cechą jest grupowanie się okresów suchych w kilku- lub kilkunastoletnie okresy.

4. W wieloleciu 1951-2010 wyróżniono trzy okresy występowania susz atmosferycznych. Okresy te wyraźnie korespondowały z okresami, w których wystąpiły długotrwałe niżówki.

5. Największe niedobory wody opadowej, najdłużej trwające niżówki letnie i letnio-jesienne oraz największe niedobory wody podczas ich trwania wystąpiły w latach 1989-1994.

Literatura

- BARTCZAK A., 2007. Wahania stanów wody (przepływów) rzeki Zgłowiączki wywołane pracą małej elektrowni wodnej (MEW) w Nowym Młynie. *Nauka Przyr. Technol.* 1, 2, #13.
- BARTCZAK A., BRYKAŁA D., 2010. Warunki hydrologiczne w rejonie planowanej odkrywki węgla brunatnego „Tomisławice” KWB „Konin” S.A. W: *Antropogeniczne i naturalne przemiany środowiska geograficznego województwa kujawsko-pomorskiego – wybrane przykłady*. Red. J. Kordowski, D. Brykała. Pr. Geogr. Inst. Geogr. Przestrz. Zagosp. PAN 223: 11-44.
- BARTCZAK A., GLAZIK R., TYSZKOWSKI S., 2013. Tendencje rocznych sum opadów atmosferycznych we wschodniej części Kujaw. *Nauka Przyr. Technol.* 7, 1, #8.
- BĄK B., ŁABĘDZKI L., 2002. Assessing drought severity with the relative precipitation index (*RPI*) and the standardized precipitation index (*SPI*). *J. Water Land Dev.* 6: 29-49.
- BĄK B., ŁABĘDZKI L., 2003. Modification of Standardized Precipitation Index *SPI* for drought monitoring in Poland. W: *Meteorological services' tasks in NATO operations, missions and exercises, 5th International Symposium on Military Meteorology*, Poznań 29.09-02.10.2003. Red. Wyd. WAT, Warszawa: 15-22.
- BOBIŃSKI E., MEYER W., 1992 a. Susza hydrologiczna w Polsce w latach 1989-1992 na tle wielolecia 1982-1992. *Gosp. Wod.* 12: 267-272.

- BOBIŃSKI E., MEYER W., 1992 b. Susza w Polsce w latach 1982-1992. Ocena hydrologiczna. *Wiad. Inst. Meteorol. Gosp. Wod.* 15, 4: 3-24.
- BONACCORSO B., BOROLI I., CANCELLIERE A., ROSSI G., SUTERA A., 2003. Spatial variability of drought; an analysis of the SPI in Sicily. *Water Resour. Manage.* 17: 273-296.
- BOX G.E.P., COX D.R., 1964. An analysis of transformations. *J. R. Stat. Soc. Ser. B* 26, 2: 211-252.
- BOX G.E.P., COX D.R., 1982. An analysis of transformations revisited, rebutted. *J. R. Stat. Assoc.* 77, 377: 209-210.
- COSTA A.C., 2011. Local patterns and trends of the Standard Precipitation Index in southern Portugal (1940-1999). *Adv. Geosci.* 30: 11-16.
- DĘBSKI K., 1952. Rozważania na temat metod przewidywania posuchy. *Przegl. Meteorol. Hydrol.* 3-4: 96-113.
- FAL B., 2004. Czy niżówki ostatnich lat są zjawiskiem wyjątkowym? *Gaz. Obs. IMGW* 3: 16-18.
- GIRGUŚ R., STRUPCZEWSKI W., 1965. Wyjątki ze źródeł historycznych o nadzwyczajnych zjawiskach hydrologiczno-meteorologicznych na ziemiach polskich w wiekach od X do XVI. WKiŁ, Warszawa.
- GUTTMAN N.B., 1999. Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 35, 2: 311-322.
- HOYLE M.H., 1973. Transformations – an introduction and a bibliography. *Int. Stat. Rev.* 41, 2: 203-223.
- ILNICKI P., FARAT R., GÓRECKI K., LEWANDOWSKI P., 2012. Mit stepowienia Wielkopolski w świetle wieloletnich badań obiegu wody. Wyd. UP, Poznań.
- JAHANGIR ALAM A.T.M., SAYEDUR RAHMAN R., SAADAT A.H.M., 2013. Monitoring meteorological and agricultural drought in Barind region Bangladesh using standard precipitation index and Markov chain model. *Int. J. Geomat. Geosci.* 3, 3: 511-524.
- JOKIEL P., 2008. Przepływy ekstremalne wybranych rzek środkowej Polski w latach 1951-2000. W: *Zjawiska ekstremalne i zdarzenia nadzwyczajne w środkowej Polsce*. Red. P. Jokiel. *Acta Univ. Lodz. Folia Geogr. Phys.* 8: 99-129 i załączniki.
- KANIECKI A., 1982. Pojemność retencyjna i zmienność zasobów wodnych małej zlewni nizinnej na przykładzie dorzecza Wrześnicy. *Geogr. Ser. UAM Pozn.* 26.
- KARAVITIS CH.A., ALEXANDRIS S., TSEMELIS D.E., ATHANASOPOULOS G., 2011. Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece. *Water* 3: 787-805.
- KHADR M., MORGENSCHWEIS G., SCHLENKHOFF A., 2009. Analysis of meteorological drought in the Ruhr Basin by using Standardized Precipitation Index. *World Acad. Sci. Eng. Technol.* 57: 607-616.
- KOWALCZAK P., FARAT R., KĘPIŃSKA-KASPRZAK M., KUŹNICKA M., MAGER P., 1997. Hierarchia potrzeb obszarowych małej retencji. *Mater. Bad. Ser. Gosp. Wod. Ochr. Wód* 19.
- KUPCZYK A., 2005. Rola czynników fizycznogeograficznych w kształtowaniu susz hydrologicznych w Europie środkowej. W: *Ekstremalne zjawiska hydrologiczne i meteorologiczne*. Red. E. Bogdanowicz, U. Kossowska-Cezak, J. Szkutnicki. *Polskie Towarzystwo Geofizyczne, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa*: 277-285.
- LAMBOR J., 1954. Stepowienie środkowych obszarów Polski. *Pr. PIHM* 34.
- LAMBOR J., 1956. Potencjalne możliwości stepowienia w Polsce. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 7: 51-64.
- LORENC H., MIERKIEWICZ M., SASIM M., 2008. Susze w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem roku 2006 (historia, przyczyny, natężenie, zasięg, skutki, wnioski). *Wiad. Meteorol. Hydrol. Gosp. Wod.* 2 (52), 1-2: 3-32.
- ŁĄBĘDZKI L., 2004. Problematyka susz w Polsce. *Woda Środ. Obsz. Wiej.* 4, 1 (10): 47-66.
- ŁĄBĘDZKI L., 2006. Susze rolnicze. Zarys problematyki oraz metody monitorowania i klasyfikacji. *Woda Środ. Obsz. Wiej. Rozpr. Nauk. Monogr.* 17.

- ŁABĘDZKI L., 2007. Estimation of local drought frequency in Central Poland using the Standardized Precipitation Index SPI. *Irrigat. Drain.* 56: 67-77.
- ŁABĘDZKI L., BĄK B., 2002. Monitoring suszy za pomocą wskaźnika standaryzowanego opadu SPI. *Woda Środ. Obsz. Wiej.* 2, 2 (5): 9-19.
- ŁABĘDZKI L., BĄK B., KAZANECKA-GESZKE E., KASPERSKA-WOŁOWICZ W., SMARZYŃSKA K., 2008. Związek między suszą meteorologiczną i rolniczą w różnych regionach Polski. *Woda Środ. Obsz. Wiej. Rozpr. Nauk. Monogr.* 25.
- MAGER P., KUŹNICKA M., KĘPIŃSKA-KASPRZAK M., FARAT R., 1999. Zmiany natężenia i częstość pojawiania się susz w Polsce. W: *Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej „Zmiany i zmienność klimatu Polski”*, 4-6 listopada 1999, Łódź. Red. A. Dubicki i in. IMGW, Warszawa: 159-164.
- MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J., 1993. The relationship of drought frequency and duration scales. W: *Eighth Conference on Applied Climatology*, 17-22 January 1993, Anaheim, California. American Meteorological Society, Boston: 179-189.
- MICHALCZYK Z., 2004. Rola obszarów wiejskich w tworzeniu i wykorzystaniu zasobów wodnych w Polsce. *Woda Środ. Obsz. Wiej.* 4, 2a (11): 13-24.
- MIODUSZEWSKI W., 2006. Woda na obszarach wiejskich. *Woda Środ. Obsz. Wiej.* 6, 1 (16): 277-295.
- OZGA-ZIELIŃSKA M., 1963. Statystyczne metody obliczania niżówek, cz. I. *Przeł. Geofiz.* 1-2: 75-87.
- OZGA-ZIELIŃSKA M., 1964. Statystyczne metody obliczania niżówek, cz. II. *Przeł. Geofiz.* 2: 109-120.
- OZGA-ZIELIŃSKA M., 1990. Niżówki i wezbrania – ich definiowanie i modelowanie. *Przeł. Geofiz.* 1-2: 33-44.
- SAKIA R.M., 1992. The Box-Cox transformation technique: a review. *Statistician* 41: 169-178.
- SMAKHTIN V.U., 2001. Low flow hydrology: a review. *J. Hydrol. (Amst.)* 240: 147-186.
- SUSZA 1992. Zasięg, natężenie, przyczyny i skutki, wnioski na przyszłość. 1992. *Mater. Bad. Ser. Hydrol. Oceanol.* 16.
- TALLAKSEN L.M., MADSEN H., CLAUSEN B., 1997. On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrol. Sci. J.* 42, 1: 15-33.
- TOKARCZYK T., 2008. Wskaźniki oceny suszy stosowane w Polsce i na świecie. *Infrastrukt. Ekol. Ter. Wiej.* 7: 167-182.
- TOKARCZYK T., 2010. Niżówka jako wskaźnik suszy hydrologicznej. IMGW, Warszawa.
- WODZICZKO A., 1947. Wielkopolska stepowieje. W: *Stepowienie Wielkopolski – cz. I.* Red. A. Wodziczko. *Pr. Kom. Mat.-Przyr. PTPN Ser. B* 10, 4: 141-152.
- WRZESIŃSKI D., 1999. Sezonowa struktura odpływu w dorzeczu Warty i jej przyrodnicze uwarunkowania. *Wyd. PTPN, Poznań.*
- ZELENHASIC E., 2002. On the extreme streamflow drought analysis. *Water Resour. Manage.* 16: 105-132.
- ZELENHASIC E., SALVAI A., 1987. A method of streamflow drought analysis. *Water Resour. Res.* 23, 1: 156-168.
- ŻURAWSKI M., 1971. Procesy stepowienia na tle niektórych zagadnień gospodarki wodnej. *Geogr. w Szkole* 24, 2: 65-71.
- ŻURAWSKI M., 1972. Procesy stepowienia w Wielkopolsce na tle wybranych elementów środowiska geograficznego. W: *Studia z geografii fizycznej.* Red. S. Kozarski. *Pr. Kom. Geogr.-Geol. PTPN* 13, 1: 253-263.

IDENTIFICATION AND EVALUATION OF THE INTENSITY OF DRY PERIODS IN EASTERN PART OF KUJAWY

Summary. The main objective of the article was the identification of atmospheric droughts and river low flows and the evaluation of their intensity in Eastern Kujawy region in Poland. The atmospheric drought evaluation process was performed with the use of the Standardised Precipitation Index (*SPI*). A properly classified value of the index informs not only about a drought event occurring, but also about its intensity in three categories: a moderate drought, severe drought and extreme drought. The analyses were carried out on the basis of the data received from five precipitation stations: Izbica Kujawska, Chodecz, Duninów, Baruchowo and Gostynin. The river low flows were described with the following parameters: duration, mean discharge, minimal discharge and the volume of water shortage during the low flow. The low flow periods were evaluated for the following rivers: Zgłowiączka, Noteć Górna and Tążyna. The analyses encompassed the period 1951-2010. Meteorological droughts of various intensity occurred with the frequency of 30% (from 29% in Duninów to 34% in Chodecz). Three characteristic periods in which atmospheric droughts of various intensity and long-term and deep low flows occurred were identified for the investigated area: 1) 1951-1959, 2) 1982-1994, 3) 2001-2008. The river low flows were associated with fluctuations, as well as with short-term, statistically significant decreasing trends of precipitation. The most intensive atmospheric and hydrological drought in the investigated period in eastern Kujawy was observed in 1989-1994. The longest low flows (over 200 days) appeared at the time when the discharges of the rivers draining the eastern part of Kujawy were at their lowest. Also the water deficit during this drought event was the highest (5,020,700 m³ in the Zgłowiączka catchment, 2,929,000 m³ in the Noteć Górna catchment, or 3,087,300 m³ in the Tążyna catchment).

Key words: meteorological droughts, low flows, *SPI*, Box-Cox transformation, moving trend, eastern Kujawy

Adres do korespondencji – Corresponding address:

Arkadiusz Bartczak, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego Polskiej Akademii Nauk w Toruniu, ul. Kopernika 19, 87-100 Toruń, Poland, e-mail: arekbartczak@gazeta.pl

Zaakceptowano do opublikowania – Accepted for publication:

18.06.2014

Do cytowania – For citation:

Bartczak A., Glazik R., Tyszkowski S., 2014. Identyfikacja i ocena intensywności okresów suchych we wschodniej części Kujaw. *Nauka Przyr. Technol.* 8, 4, #46.