

WPŁYW ZMIAN KLIMATYCZNYCH NA ODPIĘWY CAŁKOWITY I PODZIEMNY NA PRZYKŁADZIE ZLEWNI RZECZNYCH SUDETÓW I ICH PRZEDPOLA

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGES ON THE TOTAL AND GROUNDWATER RUNOFF – A CASE STUDY OF RIVER BASINS IN THE SUDETY MTS AND THEIR FORELAND

TOMASZ OLICHWER¹, ROBERT TARKA¹

Abstrakt. W artykule przedstawiono zmiany wielkości odpływów całkowitego i podziemnego pod wpływem globalnych i lokalnych zmian klimatu, na przykładzie wybranych siedmiu zlewni rzecznych Sudetów i ich przedpola. Na podstawie danych IMGW z lat 1966–2005 wyznaczono średnie roczne wartości odpływów całkowitego i podziemnego, a także wartość średniej rocznej z przepływów minimalnych siedmiodniowych, które dostarczają przydatnych informacji o suszy. Obliczone charakterystyki zestawiono z wartościami opadów, temperatury, wskaźnikiem suchości, NAO i AMO. Na obszarze Sudetów i ich przedpola nie zaobserwowano zmian w odpływie całkowitym, natomiast stwierdzono istotne zmniejszenie odpływu podziemnego, co świadczy o zmianie w strukturze zasilania wód podziemnych. Zmiany odpływów całkowitego, podziemnego oraz siedmiodniowego rocznego minimalnego przepływu wykazują największe powiązanie z NAO, co potwierdza zależność odpływu z obszaru Sudetów i ich przedpola od czynników globalnych. Ma to duże znaczenie do oceny zmian odpływu z obszaru Sudetów zgodnie ze scenariuszami klimatycznymi dla lat 2011–2030, które wskazują na znaczny wzrost temperatury powietrza i niewielkie różnice w wielkości opadów atmosferycznych. Na podstawie przeprowadzonych badań należy spodziewać się na obszarze Sudetów i ich przedpola znacznego zmniejszenia odpływu podziemnego na rzecz wzrostu odpływu powierzchniowego.

Słowa kluczowe: odpływ, zmiany klimatyczne, Sudety.

Abstract. The article presents the variability of total and groundwater runoff influenced by global and local climate changes exemplified by selected Sudetic and Fore-Sudetic river basins. The IMGW data from the years 1966–2005 allowed estimating the average annual values of the total and groundwater runoff and seven-day annual minimum flows, which provide useful information about the drought. The calculated parameters were compared with the precipitation and air temperature values, dryness index, the NAO and the AMO. In the Sudety Mts and their foreland, no changes in the total runoff have been observed, however there is a significant reduction in the groundwater runoff rate, which indicates a change in the structure of groundwater recharge. The greatest relationship of the changes in total runoff, groundwater runoff and seven-year annual minimum flow was obtained for the Oscillation NAO, which confirms that the runoff from the Sudety Mts and their foreland is dependent on global factors. It is very important to assess the changes of runoff from the study area according to climate scenarios for the years 2011–2030, which show a significant increase in air temperature and slight differences in precipitation. The studies indicate that significant reduction of groundwater runoff in favour of surface runoff increase can be expected in the Sudety Mts and their foreland.

Key words: runoff, climate changes, Sudety Mts.

¹ Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, Zakład Hydrogeologii Podstawowej, ul. Cybulskiego 32, 50-205 Wrocław;
e-mail: tomasz.olichwer@ing.uni.wroc.pl, robert.tarka@ing.uni.wroc.pl

WSTĘP

Badania przeprowadzono w celu przedstawienia zmian w wielkości odpływów całkowitego i podziemnego pod wpływem globalnych i lokalnych zmian klimatu na przykładzie wybranych zlewni sudeckich. Zasoby wodne są uzależnione od warunków klimatycznych oraz działalności człowieka. Opisujący obszar należy do klimatu umiarkowanego z przewagą wpływów oceanicznych, co powoduje znaczne roczne różnice w zasilaniu wód podziemnych. Długoterminowe obserwacje hydrologiczne i meteorologiczne dostarczają wielu danych, dotyczących temperatury, opadów i przepływów rzecznych. Natężenie przepływu rzeczno-można zmierzyć dokładniej niż pozostałe elementy bilansu wodnego, dlatego warto szczegółowo przestudować ten rodzaj danych na obszarze Sudetów. Informacje te pozwalają określić wielkość odpływu podziemnego, który jest miarą zasobów wód podziemnych. Badanie elementów bilansu wodnego jest ważne zarówno do oceny przyszłych zmian klimatycznych, jak i regionalnych skutków globalnych zmian klimatu. Długoterminowa analiza wielkości

odpływu podziemnego jest niezbędna do efektywnego zarządzania zasobami wodnymi, co ma ogromne znaczenie społeczno-gospodarcze.

Teren badań obejmuje siedem wybranych zlewni, położonych w południowo-zachodniej Polsce, o różnych powierzchniach i charakterystyce przyrodniczej (tab. 1).

Klimat regionu jest zróżnicowany, na podstawie wielolecia 1966–2005 średnia roczna suma opadów wynosi od 750 do 1900 mm, a śnieg utrzymuje się od 60 do 150 dni w roku (dane IMGW). Wartości średniej rocznej temperatury powietrza, wyznaczonej z lat 1966–2005, wynoszą około 8°C (Wrocław 8,8°C, Jelenia Góra 7,4°C, Kłodzko 7,5°C). W zlewniach obszarów górskich, gdzie dominują tereny zalesione (do 77%), odpływy podziemny i całkowity są determinowane jedynie przez czynniki naturalne. Na obszarach przedgórskich większy wpływ mają czynniki antropogeniczne – tereny leśne zajmują około 30% powierzchni, użytki rolne – do 60%, tereny zurbanizowane – do 10% (Chudzik i in., 2008).

Tabela 1

Zlewnie rzeczne obszaru badań
River basins of study area

Nr	Rzeka	Posterunek	Powierzchnia zlewni [km ²]	Typ zlewni	Podłoże skalne
1	Nysa Kłodzka	Kłodzko	1084	górska, przedgórska	krystaliczne, osadowe
2	Bystrzyca Dusznicka	Szalejów Dolny	174,8	górska	krystaliczne, osadowe
3	Biała Łądecka	Łądek-Zdrój	164,0	górska	krystaliczne
4	Bystrzyca	Krasków	683,4	górska, przedgórska	krystaliczne, osadowe
5	Ślęza	Białobrzezie	180,9	przedgórska	krystaliczne, osadowe
6	Kaczawa	Świerzawa	133,7	górska, przedgórska	krystaliczne, osadowe
7	Czarny Potok	Mirsk	55,9	górska	krystaliczne

METODY BADAŃ

W wybranych siedmiu zlewniach (fig. 1) przeanalizowano dzienne przepływy z lat 1966–2005 na podstawie danych IMGW. Obliczono odpływ podziemny za pomocą metody 1 (*fixed-interval method*) programu HYSEP (*Hydrograph separation*; Sloto, Crouse 1996). W metodzie tej w celu określenia odpływu podziemnego wyznacza się najniższą wartość przepływu na hydrogramie dla stałego przedziału czasowego (najczęściej kilkudniowy) dla wszystkich dni, począwszy od pierwszego dnia okresu rejestru. Następnie dane te posłużyły do wyznaczenia średnich rocznych wartości odpływu całkowitego i podziemnego, a także wartości średniej rocznej z przepływów minimalnych siedmiodniowych, które dostarczają przydatnych informacji o suszy.

Obliczone charakterystyki zestawiono z rocznymi wartościami opadów i średnimi wartościami temperatury ze stacji Wrocław, Kłodzko, Jelenia Góra oraz ze wskaźnikami suchości (stosunek opadu do ewapotranspiracji potencjalnej), NAO (Oscylacji Północnego Atlantyku) i AMO (Multidekadowej Oscylacji Atlantyku).

Znaczny wpływ na klimat Europy, w tym także Polski, mają zmiany cyrkulacji atmosferycznej nad Północnym Atlantykiem (Marsz, Styszyńska 2001). Charakter zmienności cyrkulacji atmosferycznej nad Północnym Atlantykiem w prosty sposób opisują wskaźniki NAO (Hurrell, 1995). Wskaźnik AMO charakteryzuje zmienność natężenia cyrkulacji termohalinowej na Atlantyku. Niektórzy badacze uwa-

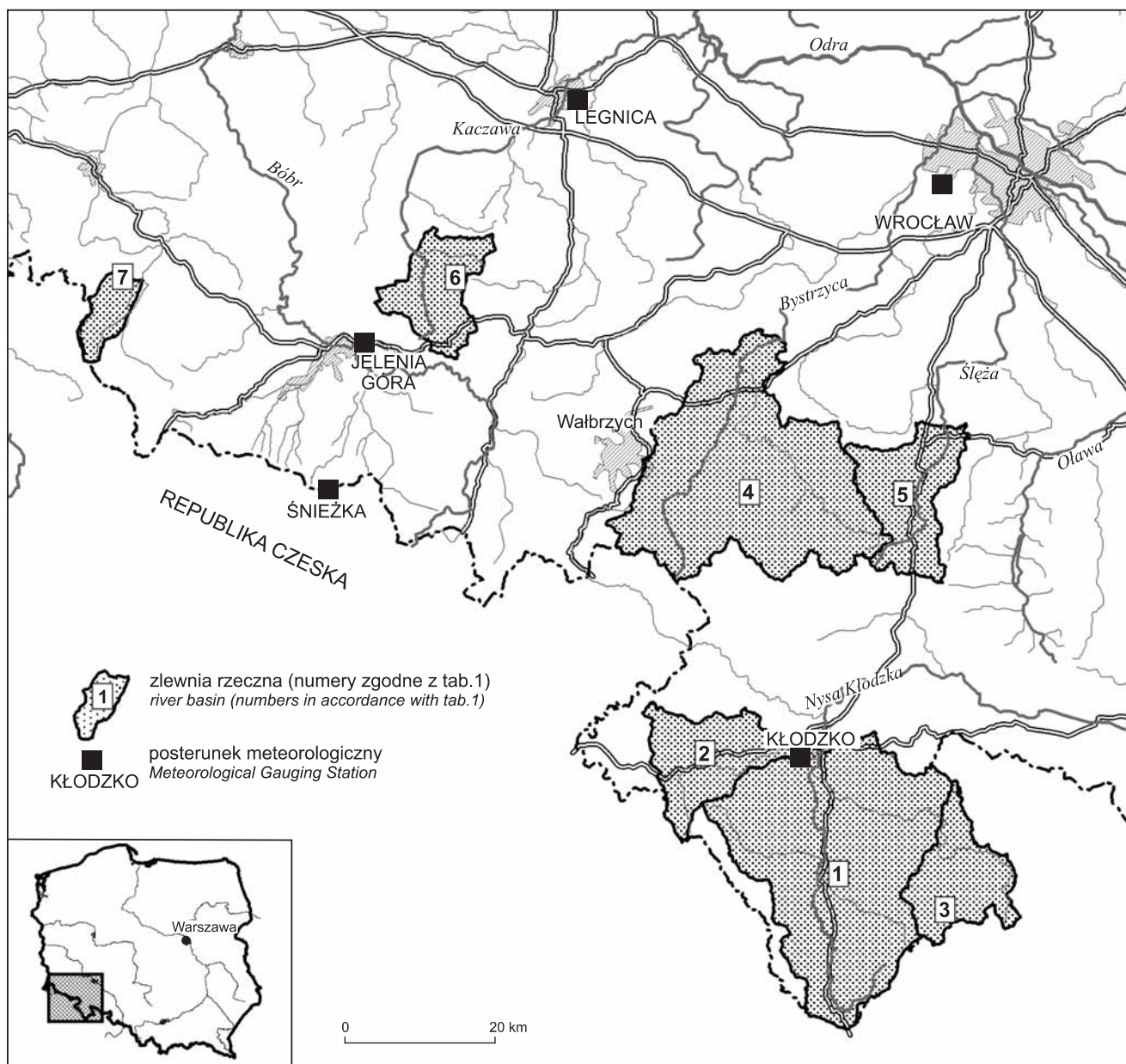


Fig. 1. Obszar badań

Research area

żają AMO za jeden z głównych długookresowych regulatorów zmian klimatu w skali globalnej, a nie tylko w atlantyckich tropikach i atlantycko-europejskim sektorze cyrkulacyjnym. Zmienność AMO określa się za pomocą indeksu

AMO, który nie ma znormalizowanej i ogólnie przyjętej postaci. Indeks AMO stanowi wartość odpowiednio zmodyfikowanej średniej rocznej anomalii SST (*Sea Surface Temperature*) z Atlantyku Północnego.

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Analizowane zlewnie charakteryzują się przepływem średnim od 0,53 (Ślęza) do 13,42 m³/s (Nysa Kłodzka). Największy średni odpływ wykazują rzeki Biała Łądecka (676 mm) oraz Czarny Potok (508 mm), natomiast najmniejszy Ślęza (92 mm) i Bystrzyca (207 mm) (tab. 2). Zmiany

odpływu całkowitego i podziemnego w czasie przedstawiono na figurze 2.

Odpływ całkowity w okresie zimowym jest od 12 do 42% wyższy niż w okresie letnim, za wyjątkiem Białej Łądeckiej, gdzie jest on prawie o 20% niższy. Jest to spowo-

Tabela 2**Charakterystyka średniego rocznego odpływu całkowitego [mm]**

Characteristics of average annual total runoff [mm]

Rzeka	Profil	Odpływ minimalny	Odpływ średni	Odpływ maksymalny
Nysa Kłodzka	Kłodzko	207	390	600
Bystrzyca Dusznicka	Szalejów Dln.	218	406	556
Biała Łądecka	Łądek-Zdrój	422	676	1181
Bystrzyca	Krasków	64	207	499
Ślęza	Białobrzezie	15	92	256
Kaczawa	Świerzawa	87	278	600
Czarny Potok	Mirsk	221	508	1024

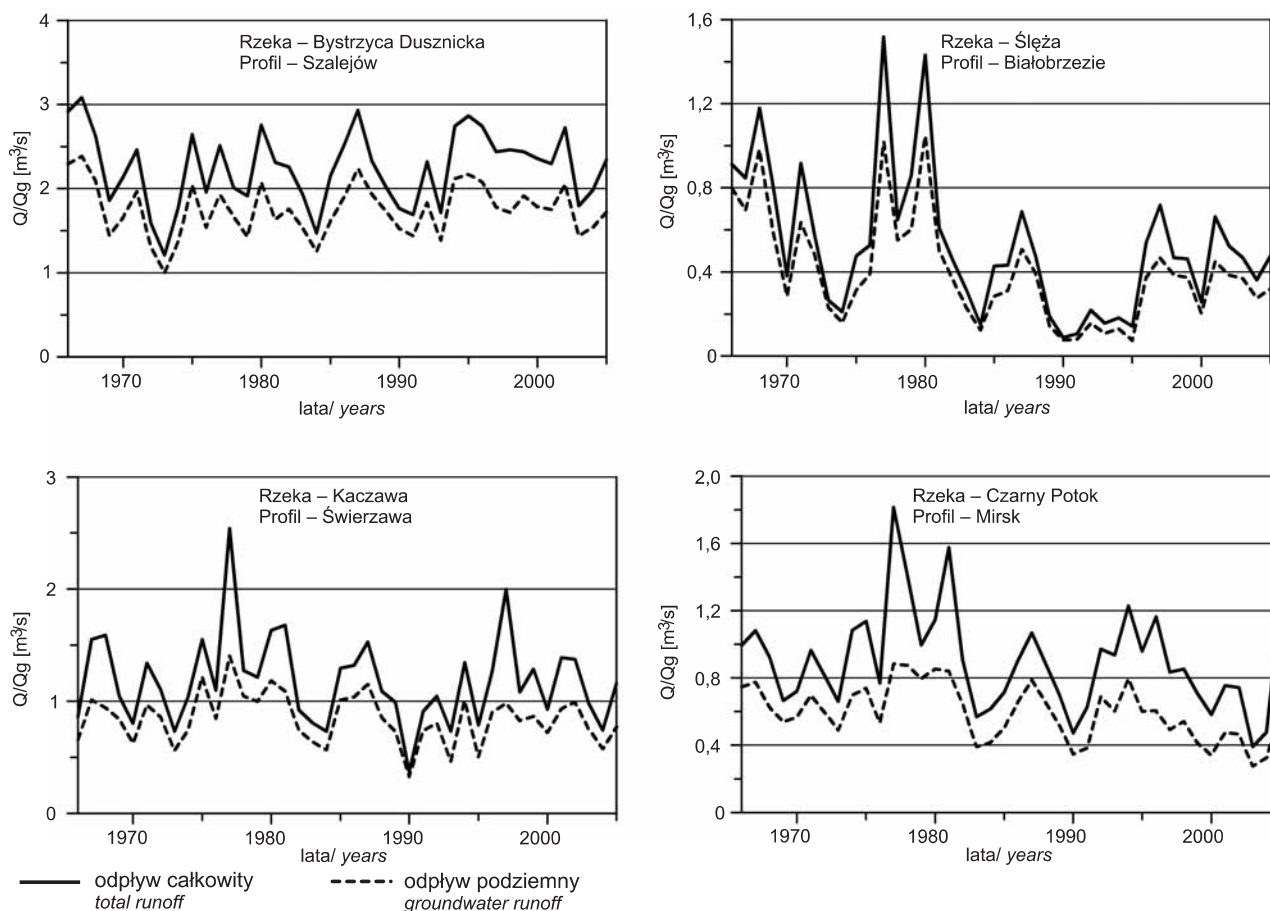
dowane wysokimi opadami notowanymi w okresie letnim (posterunek Śnieżnik). Z porównania wielkości odpływu do opadu na najbliższej stacji meteorologicznej wynika, że współczynnik odpływu w okresie zimowym jest przeciętnie dwu i półkrotnie wyższy niż w okresie letnim. Najmniejszą

różnicą charakteryzuje się Biała Łądecka (1,91), a największą – Bystrzyca Dusznicka (3,37).

Średnie wartości przepływów całkowitych zmieniały się w poszczególnych latach od 2,5 (Biała Łądecka) do ponad 17 razy (Ślęza). Najmniejszą zmienność średnich rocznych wartości przepływów stwierdzono w zlewniach najwyżej położonych, a wraz ze zmniejszaniem się średniej wysokości położenia zlewni zaobserwowano wzrost różnicy najwyższego i najniższego rocznego przepływu w rozpatrywanym okresie. Od lat 90. XX w. obserwuje się wzrost liczby dni z niskimi przepływami, co obrazuje figura 3, na której przedstawiono liczbę dni dla poszczególnych rzek z przepływami poniżej pierwszego percentyla. Do końca lat 80. XX w. było takich dni w roku średnio 42 dla każdej z rzek, a w latach 1990–2005 – ponad 56.

W celu oceny wpływu zmian klimatycznych na odpływy całkowity i podziemny obliczono wartości współczynników korelacji, które przedstawiają zmiany odpływu w czasie (tab. 3).

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń nie stwierdzono zależności zmian odpływu całkowitego w czasie (we wszystkich analizowanych zlewniach, za wyjątkiem Ślęzy – $r = -0,42$), na przyjętym poziomie istotności 0,1. Podobnie nie zauważono istotnych zmian w czasie dla siedmiodnio-

**Fig. 2. Zmiany średnich rocznych odpływów całkowitych i podziemnych wybranych rzek w latach 1966–2005**

Changes of average annual total and groundwater runoffs of selected rivers 1966–2005

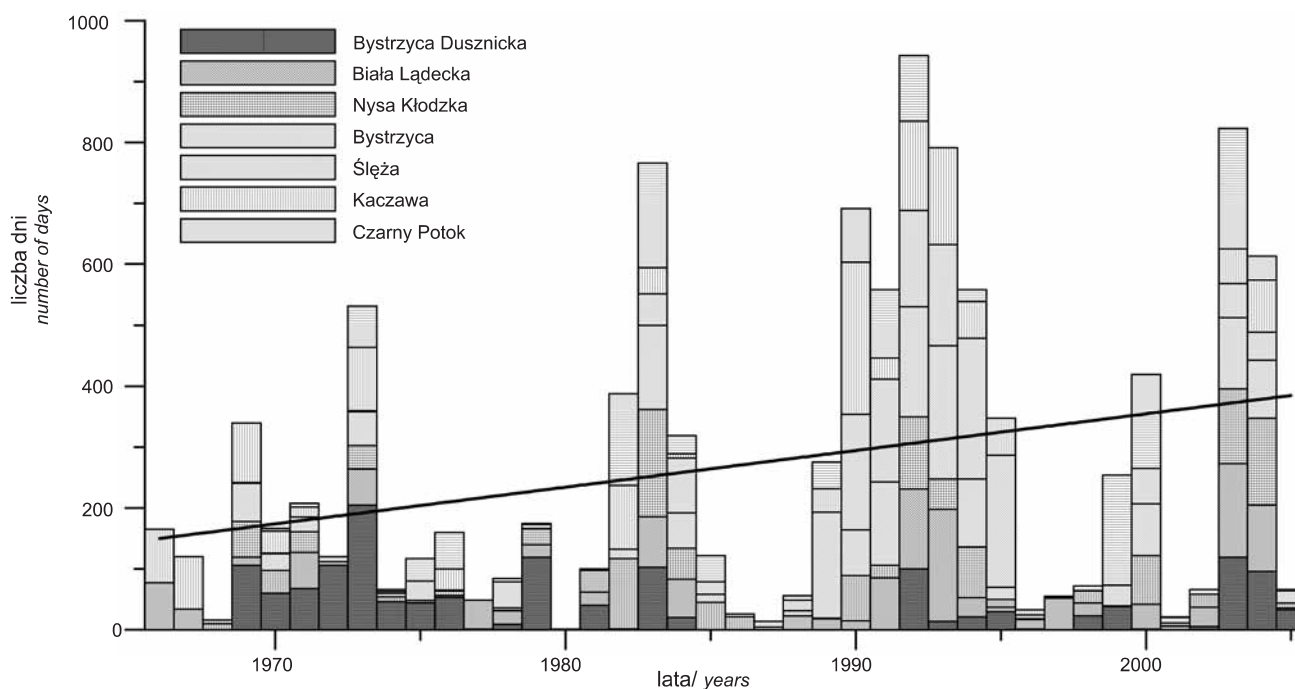


Fig. 3. Liczba dni z przepływami całkowitymi rzek poniżej pierwszego percentyla

Number of days with total river flows below the first percentile

Tabela 3

Korelacje pomiędzy rocznymi wartościami odpływów i charakterystykami klimatycznymi

Correlations between the annual values of runoffs and climate characteristics

Rzeka	Charakterystyka	Lata*	Temperatura	Opad	RDI	NAO	AMO
Bystrzyca Dusznicka	Q	0,05	-0,28	0,38	0,41	-0,21	0,25
	Qg	0,00	-0,21	0,38	0,40	-0,13	0,19
	7 dni	0,06	-0,03	0,11	0,12	0,08	-0,01
Biała Łądecka	Q	-0,25	-0,28	0,28	0,32	-0,24	-0,07
	Qg	-0,29	-0,16	0,23	0,25	-0,11	-0,16
	7 dni	0,17	-0,04	-0,18	-0,18	0,21	-0,04
Nysa Kłodzka	Q	-0,21	-0,30	0,42	0,47	-0,34	0,05
	Qg	-0,23	-0,13	0,50	0,51	-0,28	0,05
	7 dni	-0,36	0,00	0,50	0,51	-0,31	-0,12
Śleża	Q	-0,42	-0,43	0,40	0,44	-0,59	-0,02
	Qg	-0,47	-0,42	0,42	0,45	-0,59	-0,02
	7 dni	-0,56	-0,45	0,30	0,34	-0,49	-0,07
Bystrzyca	Q	-0,17	-0,35	0,39	0,42	-0,48	-0,01
	Qg	-0,34	-0,39	0,51	0,54	-0,49	-0,11
	7 dni	-0,25	-0,30	0,41	0,43	-0,33	0,09
Kaczawa	Q	-0,12	-0,38	0,21	0,30	-0,38	-0,11
	Qg	-0,19	-0,38	0,26	0,34	-0,30	-0,19
	7 dni	0,14	-0,16	0,35	0,37	-0,28	0,17
Czarny Potok	Q	-0,26	-0,34	0,13	0,23	-0,27	-0,24
	Qg	-0,50	-0,50	0,14	0,25	-0,21	-0,37
	7 dni	-0,20	-0,29	0,15	0,16	-0,30	0,14

Q – odpływ całkowity; Qg – odpływ podziemny; 7 dni – siedmiodniowe roczne minimalne przepływy; RDI – wskaźnik suchości; szare pole – poziom istotności 0,1; * – współczynniki korelacji pomiędzy odpływem rocznym a okresem badań

wego rocznego minimalnego przepływu, poza rzekami Nysą Kłodzką po profil w Kłodzku, gdzie współczynnik korelacji wynosi $-0,36$ i Ślężą, o współczynniku korelacji $-0,56$. Inaczej przedstawia się sytuacja w przypadku odpływu podziemnego. Z obliczeń dla rzek: Biała Łądecka ($r = -0,29$), Ślęża ($r = -0,47$), Bystrzyca ($r = -34$) i Czarny Potok ($r = -0,5$) wynika statystycznie istotne zmniejszenie się przepływu podziemnego w latach 1966–2005.

W drugim etapie prac porównano zmiany odpływów całkowitego, podziemnego oraz siedmiodniowego rocznego minimalnego przepływu z charakterystykami meteorologicznymi i wskaźnikami, umożliwiającymi charakterystykę zmian klimatycznych (tab. 3). Największą statystycznie istotną zależność z badanymi charakterystykami wykazuje odpływ całkowity. Dla wszystkich rzek zależność ta jest istotna w przypadku temperatury, dla pięciu rzek dla opadu i NAO, a dla sześciu dla wskaźnika suchości. W przypadku

odpływu podziemnego cztery rzeki wykazują związek z temperaturą i NAO, a pięć z opadem i wskaźnikiem suchości. Najmniejszą liczbę istotnych zależności uzyskano dla siedmiodniowego minimalnego rocznego przepływu, jednak dla pięciu zlewni wartość tego przepływu wykazuje zależność od wartości NAO.

W żadnym przypadku nie stwierdzono statystycznie istotnej zależności charakterystyk przepływu z wartością charakteryzującą AMO (tab. 3). Natomiast uzyskane statystycznie istotne ujemne korelacje badanych charakterystyk przepływu z NAO sugerują, że przy ujemnych fazach NAO wzrastają odpowiednie charakterystyki odpływu.

Na podstawie przeprowadzonych prace nie zaobserwowano zależności zmian odpływów całkowitego, podziemnego i siedmiodniowego rocznego minimalnego przepływu z wielkością zlewni czy położeniem na obszarze Sudetów.

PODSUMOWANIE

Podsumowując, w latach 1966–2005 na obszarze Sudetów i ich przedpola nie zaobserwowano zmian w odpływie całkowitym, jednak w ponad połowie rzek zmniejszył się odpływ podziemny. Zmniejszanie się odpływu podziemnego przy stałej wartości przepływu całkowitego świadczy o zmianie w strukturze zasilania wód podziemnych, na co główny wpływ może mieć zmiana struktury opadów – zmniejszenia się liczby epizodów opadowych na rzecz wzrostu ich intensywności.

Zmiany odpływu całkowitego, podziemnego oraz siedmiodniowego rocznego minimalnego przepływu wykazują największe powiązanie z Oscylacją Północnego Atlantyku (NAO), co potwierdza fakt częściowego uzależnienia odpływu z obszaru Sudetów i ich przedpola od czynników globalnych. Ma to znaczenie do oceny zmian odpływu z ob-

szaru Sudetów zgodnie ze scenariuszami klimatycznymi dla lat 2011–2030, które wskazują na znaczny wzrost temperatury powietrza ($+ 0,9^{\circ}\text{C}$ – południowo-zachodnia Polska) oraz na niewielkie różnice w wielkości opadów atmosferycznych (zmniejszenie opadów w okresie letnio-jesiennym i zwiększenie w zimowo-wiosennym) (Wibig i in., 2012). Scenariusze te wskazują również na zmianę struktury opadów, polegającą na wzroście ich intensywności. Na podstawie przeprowadzonych badań należy spodziewać się na obszarze Sudetów i ich przedpola zmniejszenia się odpływu podziemnego na rzecz wzrostu odpływu powierzchniowego, czyli przy nieznacznie zmieniających się zasobach wód powierzchniowych będzie następować obniżanie się zasobów wód podziemnych.

LITERATURA

- CHUDZIK B., TOKARCZYK T., BOGUSZ A., DĄBROWSKI M., GARNCARZ B., HOŁDA I., 2008 — Odpływ podziemny w zlewniach o różnym zagospodarowaniu. *W: Zarządzanie Zasobami wodnymi w dorzeczu Odry* (red. B. Mońka). Wyd. PZITS, **882**: 199–213.
- HURRELL J.W., 1995 — Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, **269**, 4: 676–679.
- MARSZ A., STYSZYŃSKA A., 2001 — Oscylacja Północnego Atlantyku a temperatura powietrza nad Polską. Wyd. Uczelniane WSM, Gdynia.
- SLOTO R.A., CROUSE M.Y., 1996 — HYSEP: A computer program for stream flow hydrograph separation and analysis. U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96–4040.
- WIBIG J., BRZÓSKA B., CURYŁO A., JACZEWSKI A., KONCA-KĘDZIERSKA K., LISZEWSKA M., PIANKO-KLU-CZYŃSKA K., 2012 — Dynamiczne scenariusze zmian klimatu dla Polski na lata 2011–2030. *W: Warunki klimatyczne i oceanograficzne w Polsce i na Bałtyku Południowym* (red. J. Wibig, E. Jakusik): 93–123. Wyd. IMGW, Warszawa.

SUMMARY

The article presents the variability of total and groundwater runoff affected by global and local climate changes, exemplified by some river basins from SW Poland. In seven river drainage basins, daily flows (1966–2005) were analysed based on IMGW data. The groundwater runoff rate was calculated using the HYSEP program. Subsequently, these data were used to determine the average annual values of total and groundwater runoff, as well as seven-day annual minimum flows, which provide useful information about the drought. The calculated parameters were compared with the precipitation and temperature values, dryness index, the NAO and the AMO. In the Sudety Mts and their foreland, no changes in the total runoff have been observed, but in more than half of the river basins there is a significant reduction in the groundwater runoff rate. Reducing the groundwater runoff at a constant total runoff rate indicates a change in the structure of groundwater recharge, which can have a major

impact change in the structure of precipitation in the form of a reduction in the number of precipitation events to increase their intensity. The greatest relationship of the changes in total runoff, groundwater runoff and seven-year annual minimum flow was obtained for the Oscillation NAO, which confirms that the runoff from the Sudety Mts and their foreland is dependent on global factors. It is very important to assess the changes of runoff from the study area according to climate scenarios for the years 2011–2030, which show a fairly significant increase in air temperature (+0.9°C for SW Poland) and slight differences in precipitation. These scenarios also indicate a change in precipitation patterns due to the increase of intensity. The studies indicate that significant reduction of groundwater runoff in favour of surface runoff increase can be expected in the Sudety Mts and their foreland.

