

Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Łodzi
90-743 Łódź, ul. Lipowa 16; p.moniewski@wios.lodz.pl

PIOTR MONIEWSKI

Zmienność wydajności wybranych źródeł Polski i środkowej Europy w latach 2003–2014

Discharge variability of selected springs of Poland and central Europe in the years 2003–2014

Słowa kluczowe: źródła, środkowa Europa, wydajność źródeł, zmienność sezonowa

Keywords: springs, Central Europe, discharge of springs, seasonal variability

WPROWADZENIE

Wydajność jest najważniejszą charakterystyką ilościową źródeł. Jej znaczenie można porównać do objętości przepływu w korycie rzecznym – ilość wypływającej wody jest wypadkową wielu czynników jednocześnie oddziałujących na podziemną zlewnię wypływu. Wśród nich można wyróżnić zarówno czynniki stałe, związane z lokalnymi warunkami hydrogeologicznymi (położenie, typ wypływu, powierzchnia obszaru zasilania), jak i czynniki zmieniające się w czasie (ilość wody zgromadzonej w przestrzeniach skalnych i tempo jej uzupełniania). Badanie wydajności pojedynczych źródeł dostarcza więc informacji nie tylko o samym wypływie, lecz również o drenowanym zbiorniku wód podziemnych. Jeszcze więcej danych można uzyskać, analizując wydajność większej liczby wypływów drenujących wspólny zbiornik wodonośny lub też szeregu źródeł zasilanych z izolowanych zbiorników o odmiennych własnościach hydrogeologicznych. Umożliwia to wyodrębnienie czynników mających znaczenie lokalne oraz takich, które są związane z warunkami panującymi na większym obszarze.

Pomiary wydajności źródeł w Polsce są prowadzone od lat, jednak niewiele obiektów posiada długoletnie serie pomiarowe. Wartościowym przykładem może być wydajność źródła w Wąwolnicy, mierzona od 1949 roku (Michalczyk,

Turczyński 1999). Dłuższe, ponad 30-letnie serie pomiarowe posiada także kilkadziesiąt źródeł mierzonych w sieci posterunków IMGW (Jokiel 1994, 1996). Obecnie w ramach badań prowadzonych przez PIG PIB monitorowanych jest kilkadziesiąt źródeł, spośród których dane o wydajności 29 karpackich i 8 sudeckich źródeł są publikowane w Rocznikach Hydrogeologicznych (2003–2014).

Niestety, większość z nich to małe źródła szczelinowe – przeciętna wydajność mierzonych wypływów wynosi zaledwie $0,50 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dla porównania wydajność objętych pomiarami źródeł szczelinowych w Austrii, Czechach czy w Bawarii wynosi przeciętnie $2,05 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Standardowa sieć monitoringu polskich źródeł nie obejmuje także wypływów krasowych, a wśród publikowanych danych nie znajdują się wydajności żadnego z wywierzyisk czy źródeł krasowych Tatr, Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej lub Wyżyny Lubelskiej. Całkowicie pominięte są przy tym źródła Nizy Polskiego, na którym – choć zajmuje wielokrotnie większy obszar – regularne pomiary wydajności wypływów nie są wykonywane. W wielu regionach systematyczne pomiary wydajności źródeł są prowadzone przez liczne ośrodki naukowe wyłącznie na ich potrzeby badawcze (Moniewski 2004; Barczyk 2008; Humnicki 2012; Siwek, Baścik 2013). Brakuje natomiast kompleksowego, zorganizowanego monitoringu dużych obiektów: źródeł, źródlisk i wywierzyisk, których średnia wydajność wynosi kilkadziesiąt lub kilkaset litrów na sekundę. Przeciętna wydajność austriackich wywierzyisk mierzonych w ramach państwowej służby hydrologicznej wynosi aż $205 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, przy czym z największego z nich – Waldbachursprung I, wypływa średnio ponad $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. W Polsce, mimo istnienia licznych dużych wywierzyisk, analogicznym monitoringiem objęto wyłącznie niewielkie źródła Sudetów i Karpat o średniej wydajności zazwyczaj poniżej $1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (maksimum $20,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

MATERIAŁ I METODY

Podstawą opracowania są dane z informacji publikowanych na stronach Państwowej Służby Hydrogeologicznej, Roczników Hydrogeologicznych z lat 2003–2014. Do analizy spośród obserwowanych 37 źródeł wybrano 33 obiekty (8 sudeckich i 25 karpackich), dla których ciągłe serie średnich miesięcznych wydajności objęły okres minimum 9-letni. Wykorzystano także dane pochodzące z wykonywanych co dwa tygodnie pomiarów wydajności dwóch nizinnych źródlisk: Rosanów i Ciosny (archiwum KHiGW UŁ).

Do charakterystyki zmienności wydatku źródeł zastosowano trzy współczynniki (Kříž 1973; Kresič i Stefanovič 2009), obliczane na podstawie wartości miesięcznych:

$$C_v = \frac{SD}{Q} \cdot 100\%$$

$$R = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}$$

$$V = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q} \cdot 100\%$$

gdzie:

C_v , R , V – współczynniki zmienności (według Pearsona, według Maillete'a, według Meinzera);
 Q_{\max} , Q , Q_{\min} – maksymalna, przeciętna i minimalna wydajność;
 SD – odchylenie standardowe średnich miesięcznych wydajności.

Natomiast do analizy sezonowości wydajności badanych wypływów użyto metody wektorów, zaproponowanej przez Ch. G. Markhama (1970) do badania nierównomierności opadów atmosferycznych, lecz dostosowano ją do analiz bazujących na miesięcznych wydatkach źródeł (Moniewski 2014).

WYNIKI BADAŃ

Analizowane obiekty reprezentują wszystkie liczące się masywy i grupy górskie w Sudetach i Karpatach oraz Niż Polski, choć ich rozmieszczenie jest nierównomierne (tab. 1). Podziemne zlewnie większości wypływów są zbudowane ze skał osadowych – źródła w Zakopanem-Capkach i w Falsztynie wypływają z uszczelinionych wapieni środkowojurajskich, sudeckie źródła są w większości zasilane z kredowych piaskowców i margli, a wodonoścem źródeł karpaccich są przeważnie piaskowce i łupki należące do fliszu. Jedynie źródła w Karpaczu i w Kowarach-Wojkowie zasilane są wodami ze skał magmowych (granity), wypływy w Różance i Czerniawie zaś – z metamorficznych (łupki). Zlewnię podziemną źródła w Kowalowej budują natomiast skały osadowe pochodzenia wulkanicznego (tufy i tufity).

Większość spośród badanych wypływów należy do typu szczelinowego, jedynie karpaccie źródło w Dębnie, a wśród sudeckich – źródła w Czerńcyczach i w Rudziczce, są wypływami porowymi. Należą do nich także źródła na Niżu. Nizinne wypływy porowe leżą zazwyczaj na niewielkiej wysokości i są zasilane ze zwirowo-piaszczystych osadów pochodzących z erozji górskich masywów lub naniesionych przez lądolód. Dzięki dużemu rozprzestrzenieniu utworów wodonośnych lub znacznej ich miąższości wypływy porowe cechuje na ogół większa wydajność, wynosząca przeciętnie $9,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a największym z nich jest źródło w Rosanowie ($Q = 45,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Natomiast źródła szczelinowe, choć

Tab. 1. Charakterystyki wydajności polskich źródeł badanych w latach 2003–2014
 Tab. 1. Characteristics of Polish springs discharge in the years 2003–2014

Lp.	Nazwa źródła / spring name	Lokalizacja / location	Stratygrafia (litologia) / Stratigraphy (Lithology)	Wysokość / height [m n.p.m. / m a.s.l.]	Typ / type	Qr [dm ³ ·s ⁻¹]	Cv [%]	R	V [%]	IS [%]	PK [dzień / day]
1	Zakopane-Capki	Tatry	Pg _{Fielol} (w)	908	S	20,9	112	p	1946	41,0	10 V
2	Karpacz ^a	Karkonosze	C ₂ {g}	712	S	0,274	496	p	5963	38,6	29 IV
3	Wetlina	Bieszczady	Pg _{ol} (pc+H)	694	S	0,252	54,2	17,9	469	18,9	24 IV
4	Falsztyn	Pieniny Spiskie	J _{1+K1} (w)	648	S	1,11	58,8	31,8	305	23,0	18 V
5	Jaworki-Biała Woda	Małe Pieniny	J ₂ (w)	630	S	0,067	75,8	p	509	26,9	9 VI
6	Kowalowa	G. Wałbrzyskie	P ₁₊₂ (t+tf)	626	S	4,66	99,4	391	1929	33,7	12 IV
7	Dworniczek	Bieszczady	Pg _{ol} (pc)	565	S	0,448	126,5	204	2268	23,6	15 V
8	Dobromyśl	G. Stołowe	K ₂ (pc)	553	S	1,13	73,8	138	483	27,7	12 V
9	Kowary-Wojków	R. Janowickie	C ₂ {g}	542	S	0,365	80,6	27,7	731	24,4	24 IV
10	Ponikiew	B. Mały	K ₂ (pc+zc+H)	539	S	0,095	81,3	p	1058	24,9	12 V
11	Zawadka-Rojówka ^b	B. Wyspowy	Pg _{gr} (H+pc)	530	S	0,450	64,8	74,0	487	24,1	6 V
12	Różanka	G. Bystrzyckie	PR (f)	522	S	0,246	32,7	9,13	265	18,1	30 IV
13	Młoty ^b	G. Bystrzyckie	K ₂ (me)	521	S	1,51	35,1	5,00	172	13,9	25 IV
14	Radoszyce	Bieszczady	Pg _{gr} (pc+H)	515	S	0,675	57,8	127	373	18,3	22 IV
15	Ustroń-Dobka	B. Śląski	K ₂ (pc+H)	500	S	0,558	90,0	200	1784	24,7	23 IV
16	Kamesznica	B. Śląski	Pg _{ol} (pc+H)	497	S	1,46	80,9	500	685	28,2	14 IV
17	Wierchomla	B. Sądecki	Pg _{gr} (H+pc)	495	S	0,892	41,5	9,78	453	10,4	15 V
18	Bystre-Rabe ^c	Bieszczady	Pg _{ol} (pc+H)	480	S	1,07	34,3	6,36	225	13,4	12 V
19	Rytko-Roztoka ^a	B. Sądecki	Pg _{Fielol} (pc+H)	480	S	0,058	79,6	p	1029	28,6	6 VI
20	Szczytna Śląska	G. Bystrzyckie	K ₂ (me)	478	S	10,8	16,2	1,88	70,8	4,68	17 IV
21	Czerniawa	G. Izerskie	PR (f)	453	S	3,02	99,7	p	1059	37,1	27 V
22	Młynne	B. Wyspowy	Pg _{gr} (pc)	425	S	0,346	87,7	100	1429	29,0	16 V
23	Bezmechowa Góra	G. S.-T.	Pg _{ol} (H+me)	395	S	0,857	30,3	11,9	166	11,9	7 IV
24	Zbyszyc ^c	P. Roznowskie	Pg _{ol} (pc+H)	380	S	0,243	49,6	14,3	383	11,3	20 V
25	Czernichów	B. Mały	K ₂ (pc)	370	S	0,210	98,6	105	494	31,8	17 IV
26	Kąty	B. Niski	Pg _{gr} (pc+H)	350	S	0,081	25,4	5,00	148	8,55	9 V

27	Sanok-Olechowce	G. S.-T.	P _{g_{ol}} (t+pc)	340	S	0,231	29,5	4,31	186	5,44	5 V
28	Stróża ^a	B. Makowski	P _{g_{ol}} (pc+t)	320	S	0,138	61,3	23,7	493	11,9	25 IV
29	Babica	P. Wielickie	K (pc+t)	289	S	0,297	32,7	5,65	266	12,6	23 IV
30	Jodłówka Tuchowska ^b	P. Ciężkowickie	P _{g_{tt}} (pc)	280	S	0,065	77,8	33,0	489	31,2	26 IV
31	Dębno	K. O.-N.	Q (ż+p)	531	P	9,00	90,2	43,7	1369	20,9	5 VI
32	Czerńczyce ^a	Prz. Sudeckie	Q (p+ż)	272	P	0,496	3,55	1,17	16,1	1,18	20 III
33	Rudziejka	Prz. Sudeckie	Q (p+ż)	258	P	1,65	17,2	1,78	60,6	2,43	29 III
34	Rosanów ^b	W. Łódzkie	Q (p+ż)	150	P	45,0	8,78	2,59	79,9	4,76	29 III
35	Ciosny ^b	W. Łódzkie	Q (p+ż)	145	P	22,0	11,5	2,94	109	5,58	27 IV

Dane z okresu: a – 2003–2011, b – 2003–2012, c – 2006–2014; Skróty: G. – Góry / Mountains, R. – Rudawy, B. – Beskidy / The Beskid Mountains, G. S.-T. – Góry Sanocko-Turczańskie / Sanocko-Turczan'skie Mountains, P. – Pogórze / Foothills, K. O.-N. – Kotlina Orawsko-Nowotarska / Orawsko-Nowotarska Basin, Prz. – Przedgórze / Foreland, W. – Wzniesienia / Hills

Oznaczenia stratygraficzne: Q – czwartorzęd / Quaternary, Pg – Paleogen / Paleogene, Ol – oligocen / Oligocene, E – eocen / Eocene, Pc – paleocen / Paleocene, K – kreda / Cretaceous, K₁ – kreda górna / Upper Cretaceous, K₂ – kreda dolna / Lower Cretaceous, J₂ – jura środkowa / Middle Jurassic, C₂ – karbon górny / Upper Carboniferous, P₂ – perm środkowy / Middle Permian, P₁ – perm dolny / Lower Permian, PR – proterozoik / Proterozoic

Oznaczenia litologiczne: ż – żwir / gravels, zc – zlepienie / conglomerates, p – piaski / sands, pc – piaskowce / sandstones, t – łupki / shales, w – wapień / limestones, me – margle / marls, tt – tufy / tuffites, tf – tufy / tuffs, {g} – granity / granites
 p – wypływ okresowy / periodic spring; typ źródła / spring type: S – szczelinowe / fissure, P – porowe / porous; Qr – średnia roczna wydajność / annual mean discharge, Cv – współczynnik zmienności / variability index, R – współczynnik zmienności Mailliet'a / Mailliet's variability index, V – współczynnik zmienności Meinzera / Meinzer variability index, IS – indeks sezonowości Markhama / Markham seasonality index, PK – pora koncentracji / date of concentration

o wiele liczniejsze, drenują niewielkie, zazwyczaj izolowane zbiorniki składające się z sieci drobnych spękań skalnych, których pojemność jest ograniczona, a wydajność – zależna od tempa uzupełniania ich zasobów. Dlatego przeciętna wydajność źródła szczelinowego sięga zaledwie $0,41 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, choć z niektórych obiektów może wypływać znacznie więcej wody (Zakopane-Capki – $20,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Szczytna Śląska – $10,8 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Jednak wydajność tylko czterech badanych źródeł jest większa niż $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – IV klasa wydajności wg Meinzera, a 9 wypływów należy do klasy V. Blisko połowa źródeł (48,6%) kwalifikuje się do VI klasy wydajności, a w klasie VII znalazło się 5 wypływów (14,2%). Najmniejszym z obserwowanych źródeł jest wypływ w Rytrze-Roztoce o przeciętnej wydajności wynoszącej zaledwie $0,058 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Zróżnicowana jest także dynamika wydajności badanych wypływów. W analizowanej grupie znajduje się 29 źródeł stałych i 6 wypływów okresowo zaniwiających. Przeciętny współczynnik zmienności wydajności źródeł (C_v) wyniósł 61,3%, przy czym zmienność wypływów szczelinowych ($C_v = 69,3\%$) jest kilkakrotnie większa niż źródeł porowych ($C_v = 11,5\%$) – tab. 2. Najwyższym (skrajnie wysokim: $> 150\%$) współczynnikiem zmienności wydajności ($C_v = 497\%$) charakteryzuje się szczelinowe, okresowe źródło w Karpaczu. Wydajność aż 63% ogółu źródeł charakteryzuje się dużą i bardzo dużą zmiennością (40–150%). Wśród nich znajduje się tylko jedno źródło porowe – w Dębnie ($C_v = 90,2\%$). Zmienność małą ($< 20\%$) odnotowano w zaledwie 5 źródłach, wśród których jest tylko jeden wypływ szczelinowy – w Szczytnej Śląskiej ($C_v = 16,2\%$).

Tab. 2. Charakterystyki wydajności analizowanych polskich źródeł w latach 2003–2014
Tab. 2. The characteristics of analyzed Polish springs discharge in the years 2003–2014

Typ / Type	Liczba / Number	Q	C_v	R	V	IS	PK
Szczelinowe / Fissure	30	0,41	69,3	25,7	487,7	28,8	2 maja / May 2
Porowe / Porous	5	9,00	11,5	2,6	79,9	4,8	29 marca / March 29

Q – średnia wydajność źródła / spring discharge [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], C_v – współczynnik zmienności / variability index [%], R – współczynnik zmienności Mailllete’a / Mailllete variability index, V – współczynnik zmienności Meinzera / Meinzer variability index, IS – indeks sezonowości / seasonality index [%], PK – pora koncentracji / date of discharge concentration [dzień/day]

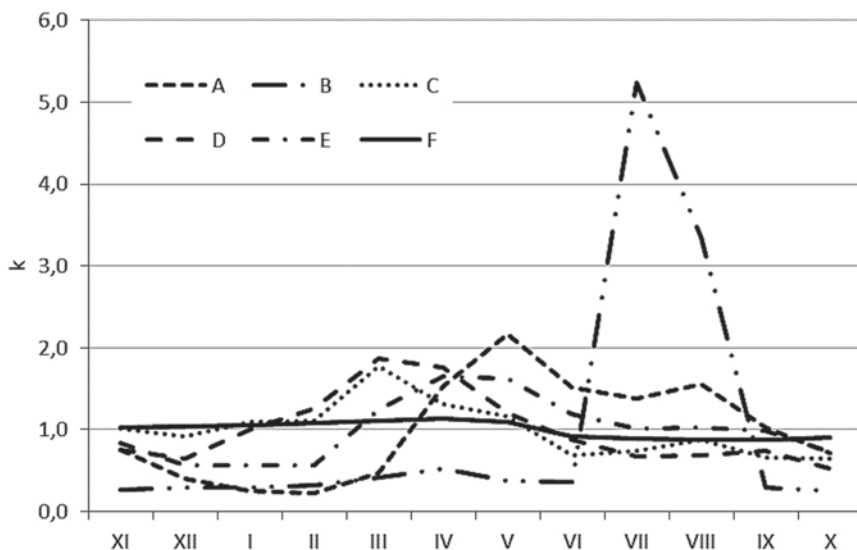
Nieco inne wnioski wypływają z zastosowania w ocenie wydajności wypływów klasycznego współczynnika zmienności Mailllete’a. W grupie źródeł stale funkcjonujących największą zmiennością odznacza się wypływ w Kamesznicy, w którym ilość wypływającej wody zmienia się od 10,0 do zaledwie $0,02 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($R = 500$). Także według tego kryterium przeciętny współczynnik zmienności wypływów

porowych jest blisko 10-krotnie mniejszy niż w przypadku źródeł szczelinowych. Spośród wypływów porowych tylko źródło w Dębnie można zaliczyć do zmiennych ($10 < R < 50$), a pozostałe do wypływów stałych ($1 < R < 2$) lub mało zmiennych ($2 < R < 5$). Natomiast w grupie źródeł szczelinowych znajduje się tylko jeden wypływ stały (Szczytna Śląska) i jeden mało zmienny (Sanok-Olchowce), zaś aż 43% to źródła bardzo zmienne ($R > 50$).

Zmienność wydajności można opisać z zastosowaniem jeszcze jednego współczynnika – Meinzera. Jego skrajne wartości reprezentują ponownie źródła: w Karpaczu ($V = 5963\%$) i w Czerńcicach ($V = 16,1\%$), które jako jedyne należy do stałych ($0 < V < 25\%$). Do wypływów mało zmiennych ($25 < V < 100\%$) można zaliczyć tylko dwa źródła porowe (Rudziczka i Rosanów) oraz szczelinowy wypływ w Szczytnej Śląskiej, zaś pozostałe jedno źródło porowe (Dębno) i aż 30 szczelinowych – do zmiennych ($V > 100\%$).

Sumowana średnia wydajność wszystkich mierzonych źródeł wyniosła $128 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, przy czym najniższa była w październiku ($106,6 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), najwyższa zaś w kwietniu ($162,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Poszczególne wypływy są znacznie bardziej zróżnicowane pod względem sezonowego przebiegu wydajności, która zmienia się wraz z rocznym rozkładem zasilania atmosferycznego. Połowa źródeł (18) charakteryzuje się prostym reżimem, z jednym maksimum rocznym, druga zaś (17) – reżimem złożonym, o dwóch, a nawet trzech kulminacjach wydajności w ciągu roku. W różnych porach roku notowano także ich najwyższe wydajności – największa grupa osiąga kulminację w miesiącach wiosennych: marcu (9), kwietniu (12) i maju (6), natomiast maksimum wydajności sześciu wypływów jest przesunięte na miesiące letnie (VI–VII). Dwa źródła charakteryzują się bardziej „oceanicznym” reżimem wydajności – źródło w Czerniawie, które leży najdalej na zachód, osiąga maksimum w styczniu, przy czym jest to pierwszy z miesięcy (I–IV), w których wydajność jest bardzo wysoka. Natomiast wydatek położonego na Przedgórzu Sudeckim wypływu w Czerńcicach jest bardzo wyrównany, z nieznacznie podwyższonym zasilaniem w styczniu i lutym. Jednak żaden z wypływów nie osiąga maksimum wydajności w okresie od sierpnia do grudnia, co dowodzi względnie szybkiego krążenia wody w ich zlewniach podziemnych i podkreśla rolę roztopów w zasilaniu zbiorników drenowanych przez te źródła.

Dodatkowych informacji o krążeniu wody może dostarczyć analiza minimalnej wydajności źródeł. W żadnym z wypływów nie wypada ona pomiędzy marcem a lipcem. Największą liczbę źródeł charakteryzuje minimum wydajności w październiku (11), styczniu (6) i grudniu (5). Najwcześniej, bo już w sierpniu, wskutek dużej ewapotranspiracji wyczerpują się zasoby najniższej położonych źródlisk nizinnych – Rosanów i Ciosny. Stwierdzono przy tym słabą zależność pomiędzy miesiącem o najniższej wydajności a rzędną położenia źródła ($r = 0,31$), co również wskazuje na istotną rolę zasilania niwalnego. Jednak w przypadku



Ryc. 1. Zróżnicowanie przebiegu miesięcznego współczynnika wydajności (k) wybranych źródeł

Fig. 1. Differences of the monthly annual course of the discharge coefficient (k) for the selected springs

A – Zakopane-Capki, B – Karpacz, C – Kamesznica, D – Jodłówka Tuchowska, E – Dębno, F – Rosanów; $k = Q_i/Q_r$; wydajność / discharge: Q_i – średnia w danym miesiącu / monthly average, Q_r – średnia roczna / annual mean

źródeł o złożonym reżimie ustalenie relacji pomiędzy zasilaniem atmosferycznym a wydajnością jest bardziej skomplikowane.

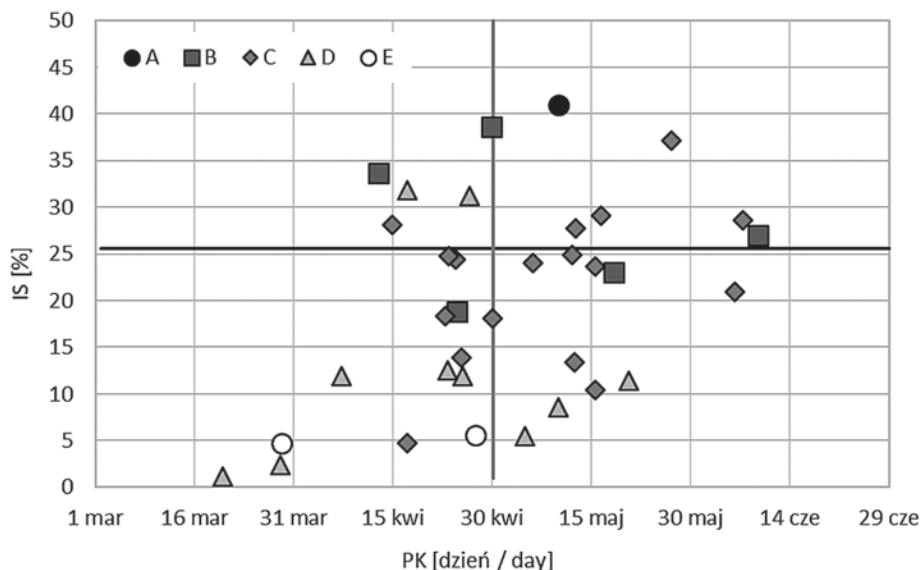
Przykłady źródeł o różnym reżimie przedstawiono na ryc. 1 za pomocą współczynnika wydajności (k). Wydajność źródłiska w Rosanowie (F) ma najmniejszą zmienność i jedno mało wyraźne maksimum wiosenne. Z kolei źródło w Karpaczu (B) ma bardzo dużą zmienność wydajności, lecz wiosenne maksimum niemal niknie na tle wyraźnej kulminacji letniej. Źródła w Kameszniczy (C) i w Zakopanem-Capkach (A) mają śnieżno-deszczowy reżim wydajności, przy czym znacznie wyżej położone źródło tatrzańskie osiąga kulminację roztopową o dwa miesiące później. Podobna różnica zachodzi pomiędzy kulminacjami wydajności źródeł w Jodłówce Tuchowskiej (D) i Dębnie (E), gdzie jednak zasilanie opadowe ma bardzo niewielki udział w jej kształtowaniu.

Zmiany wydajności tylko po części wynikają z rozkładu zasilania atmosferycznego w ciągu roku, gdyż duże znaczenie w transformowaniu go w odpływ podziemny mają cechy wodonośca i hydrogeologiczny typ wypływu. Różnice w przebiegu wydajności odzwierciedlają miary sezonowości Markhama: in-

deks sezonowości (*IS*) i pora koncentracji wydajności (*PK*). Pierwsza z tych miar może przyjmować wartości w zakresie od 0 do 100%. Wpływy o równomiernie rozłożonym odpływie w ciągu roku charakteryzują najniższe indeksy sezonowości, natomiast wysoki indeks sezonowości oznacza wydajność wyraźnie skoncentrowaną w pewnym miesiącu, wskazanym przez porę koncentracji (Tomalski, Tomaszewski 2015). Źródła porowe odznaczają się pięciokrotnie niższym wieloletnim wskaźnikiem sezonowości wydajności ($IS = 4,8\%$) niż wpływy szczelinowe ($IS = 23,8\%$). Najwyższą w grupie źródeł porowych sezonowością ($IS = 20,9\%$) wyróżnia się wpływ w Dębnie. Dorównuje ona wartości przeciętnej dla źródeł szczelinowych, spośród których najbardziej sezonowo zróżnicowaną wydajność ma położone niżej – ale w niedalekiej odległości – źródło Zakopane-Capki ($IS = 41,0\%$), a także wpływy w Karpaczu ($IS = 38,6\%$) i Czerniawie ($IS = 37,1\%$). Najniższą sezonowością wydajności ($IS < 10\%$) charakteryzują się natomiast szczelinowe źródła w Szczytnej Śląskiej, Sanoku-Olchowcach i Kątach, podobnie jak cztery pozostałe źródła porowe, których indeksy sezonowości wydajności zawierają się w zakresie od 1 do 6%. Oznacza to że w obu grupach wpływów można znaleźć źródła o odpływie silnie skoncentrowanym sezonowo lub równomiernie rozłożonym na wszystkie miesiące roku.

Różnice sezonowe powodują, że wydajność wypływu jest na ogół skupiona w określonej porze i może być wyrażona konkretnym terminem. W wieloletniej porze koncentracji wydajności badanych wpływów można zauważyć zdecydowaną różnicę – koncentracja wydajności źródeł porowych (29 III) następuje o ponad miesiąc wcześniej niż szczelinowych (2 V). Wynika to przede wszystkim z rzędnej położenia źródeł – w najwyższej położonym ze źródeł porowych (Dębno) pora koncentracji wydajności jest opóźniona nawet o 2 miesiące w stosunku do pozostałych wpływów tej grupy (5 VI). Jeszcze później (9 VI) odpływ koncentruje się w szczelinowym źródle w Jaworkach-Białej Wodzie, a także w źródle Rytro-Roztoka (6 VI). Najwcześniej koncentrację wydajności osiągają natomiast wpływy w Bezmiechowej (7 IV), Kowalowej (12 IV) i Kamesznicy (14 IV). Może przy tym zastanawiać późna pora koncentracji wydajności źródła w Czerniawie (27 V), w przypadku którego miesiącem o największym odpływie był styczeń, jednak wydajność tego wypływu ma także drugą, wyraźną kulminację spowodowaną zasilaniem letnimi opadami. Na ogół jednak pora koncentracji odpowiada wypadkowej terminów największego odpływu ze źródeł.

Rozkłady obu miar sezonowości odznaczają się pewnymi prawidłowościami – źródła, które cechuje wyższy indeks sezonowości, mają też na ogół późniejszą porę koncentracji. Korelacja pomiędzy tymi miarami nie jest zbyt silna ($r = 0,39$), niemniej jednak wskazuje na fakt, iż sezonowość wydajności wpływów o wyraźnie dominującym rodzaju zasilania – najczęściej roztopowym – jest większa (ryc. 2). Z kolei w miarę wzrostu udziału opadów stałych w zasilaniu



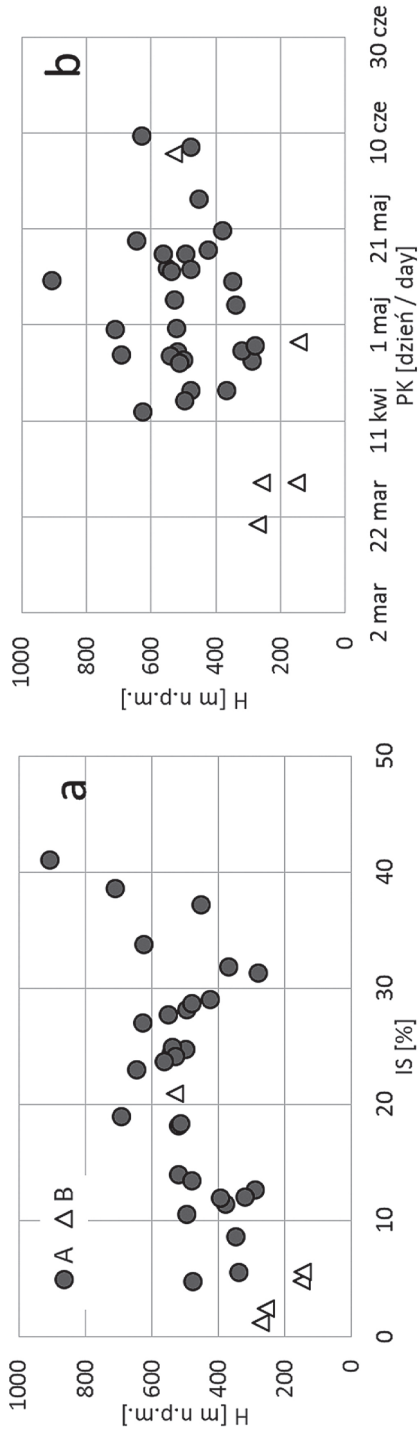
Ryc. 2. Indeks sezonowości (IS) i pora koncentracji wydajności (PK) według wysokości wypływów. Linie wskazują wartości przeciętne

Fig. 2. Seasonality index (IS) and date of discharge concentration (PK) according to height of the springs. The lines indicate mean values (median)

Wysokość (w m n.p.m.) / height (in meters a.s.l.): A – ponad / over 800, B – 800–600, C – 600–400, D – 400–200, E – poniżej / less than 200.

atmosferycznym topnieniu pokrywy śnieżnej później się rozpoczyna i później kończy, a więc i pora koncentracji wydajności przesuwana się na bardziej odległy termin. Potwierdzeniem jest istotny statystycznie związek pomiędzy rzędną wypływu wody a indeksem sezonowości ($r = 0,51$) oraz porą koncentracji ($r = 0,40$). Wynika stąd, że wyżej położone wypływy na ogół charakteryzują się wyższym stopniem sezonowości wydajności i późniejszą porą jej koncentracji (ryc. 3). W przypadku źródeł porowych zależności te są jeszcze bardziej wyraźne ($r = 0,82$, $r = 0,71$), głównie za sprawą wspomnianego źródła w Dębnie.

Uzyskane wyniki warto odnieść do analogicznych charakterystyk wydajności pozostałych źródeł środkowej Europy (tab. 3). Wśród analizowanych 53 wypływów 17 stanowiły źródła szczelinowe, a 8 – porowe; oprócz nich 28 źródeł zaliczono do wypływów krasowych (wywierzyisk). Jak już wspomniano, charakteryzują się one większą przeciętną wydajnością – dotyczy to nie tylko źródeł szczelinowych, ale także porowych, w których przeciętna ilość wypływającej wody jest blisko 10-krotnie większa niż w badanych źródłach polskich. Jeszcze większa jest przeciętna wydajność wywierzyisk ($Q = 204,2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), spośród któ-



Ryc. 3. Indeks sezonowości (a) i pora koncentracji wydajności (b) w funkcji wysokości wypływów: A – szczelinowych, B – porowych
 Fig. 3. Seasonality index (a) and date of discharge concentration (b) according to height of the springs: A – fissure, B – porous

Tab. 3. Charakterystyki przeciętnych miesięcznych wydajności czeskich, niemieckich i austriackich źródeł w latach 2003–2014

Tab. 3. Characteristics of mean monthly discharge of Czech, German and Austrian springs in the years 2003–2014

Typ / Type	Liczba / Number	Q	C_v	R	V	IS	PK
Krasowe / Karst	28	204,2	57,6	22,5	525,0	24,3	20 maja / May 20
Szczelinowe / Fissure	17	2,05	50,0	6,9	242,7	18,5	22 kwietnia / April 22
Porowe / Porous	8	88,9	30,6	3,8	179,6	19,1	26 maja / May 26

Objaśnienia jak w tab. 2 / for explanation see tab. 2.

rych 3 zaliczane są do II klasy wydajności wg Meinzera ($1 < Q < 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), a 13 do klasy III ($0,1 < Q < 1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Pewne cechy wydajności także i w większej zbiorowości należy wiązać z hydrogeologicznym typem wypływu. Przeciętny współczynnik zmienności wydajności źródeł porowych ($C_v = 30,6\%$) jest tu wyraźnie niższy niż źródeł szczelinowych ($C_v = 50,0\%$). Najbardziej zmienne są natomiast źródła krasowe ($C_v = 57,6\%$). Jednak wywierzyska, z racji dużej wydajności i znacznych rozmiarów drenowanego zbiornika wód podziemnych, rzadko wysychają (Moniewski 2015) – odnotowano tylko jedno źródło okresowe w tej grupie (3,5% jej liczebności – Brunntal). Do źródeł okresowych należą także dwa wypływy szczelinowe (12% wszystkich szczelinowych – Novy Malin oraz Schonebenquelle) i jeden wypływ porowy, a właściwie najwyżej położony (2005 m n.p.m.) oraz nieaktywny zimą wypływ rumoszowy (13% porowych – Gossenbachquelle).

Podobną relację znajdziemy pomiędzy pozostałymi współczynnikami zmienności wydajności – również i one wskazują na wyraźnie wyższe zróżnicowanie ilości wody wypływającej w źródłach, których wodonoścem są skały o większej przewodności hydraulicznej. Zmienność wydajności mierzona współczynnikiem Meinzera (V) dla czeskich, niemieckich czy austriackich źródeł porowych – często rumoszowych, jest ponad dwukrotnie większa niż źródeł polskich, zasilanych wyłącznie z osadów piaszczysto-żwirowych. Odwrotnie natomiast kształtuje się zmienność źródeł szczelinowych – mniejsze źródła polskie są bardziej wrażliwe na wyczerpanie się zasobów, więc zmienność ich wydajności jest dwukrotnie większa (przeciętny $V = 487,7\%$). Jednak w skrajnych przypadkach współczynnik zmienności wg Meinzera źródeł Alp czy Masywu Czeskiego może sięgać ponad 1200% w przypadku źródeł szczelinowych i aż 2500% dla wypływów krasowych.

Także oparty na ekstremach wydajności współczynnik Maillete'a (R) dla polskich źródeł szczelinowych jest prawie 4 razy wyższy aniżeli dla ich zagranicznych odpowiedników i przewyższa nawet przeciętną wartość obliczoną dla źródeł krasowych. Jednak te ostatnie też mogą posiadać w skrajnych przypadkach o wiele większą zmienność – maksymalna wydajność największego wywierzyska okresowego wyniosła $355 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wydajność najbardziej zmiennego, ale stale funkcjonującego wypływu krasowego Rettenbachquelle zmieniała się od 987 do zaledwie $0,8 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – w tym przypadku współczynnik R wynosi ponad 23 tysiące. Wydajność polskich wywierzysk także zmienia się w ciągu roku, jednak nie przyjmuje aż tak dużej rozpiętości. W Tatrach rozkład zasilania jest bardziej równomierny w ciągu roku – ze względu na niższą wysokość położenia obszaru alimentacyjnego wywierzysk zasilanie niwalne ma mniejszy udział, a obfite letnie opady – większe znaczenie. Dlatego współczynniki zmienności R wydajności wywierzysk tatrzańskich przybierają wartości od 5,2 do 125 (Małecka 1997).

Odmienne warunki zasilania decydują także o zróżnicowaniu sezonowej zmienności wydajności. Polskie źródła porowe cechuje 4-krotnie niższy indeks sezonowości niż źródła poza granicami kraju, natomiast sezonowość źródeł szczelinowych jest nieco wyższa i dorównuje sezonowości wypływów krasowych ($IS = 24,3\%$). Ponownie dowodzi to niewielkiej zasobności drenowanych zbiorników i ich wrażliwości na zasilanie bądź z roztopów, bądź z opadów deszczu. Najwyższe indeksy sezonowości największych wywierzysk krasowych ($IS = 42,2\text{--}60,2\%$) przewyższają jednak indeks sezonowości wydajności źródła w Zakopanem-Capkach. Ale zarówno wśród polskich, jak i zagranicznych wypływów można nierzadko spotkać źródła o indeksie sezonowości poniżej 10%.

Koncentracja wydajności źródeł Czech, Niemiec i Austrii występuje na ogół później niż źródeł polskich. Źródła szczelinowe osiągają wprawdzie kulminację wydajności już 22 kwietnia (polskie 5 V), ale wśród wypływów krasowych występuje ona o 4 tygodnie (20 V), a porowych o 5 tygodni później (26 V). Pora koncentracji jest uwarunkowana klimatycznie – mimo, że analizowane źródła szczelinowe spoza Polski leżą nieco wyżej (średnio 605 m n.p.m. – polskie 501 m n.p.m.), to jednak położenie bliżej wpływów atlantyckich sprawia, że roztopy występują tam wcześniej. Z kolei w wyżej położonych wypływach krasowych (średnio 704 m n.p.m.) notowano wzrost wydajności później niż w szczelinowych, lecz wcześniej niż w wypływach porowych i rumoszowych (średnio 968 m n.p.m.). Także i w tym zestawieniu wyników widać związek sezonowości wydatku źródeł i ich lokalizacji. Zarówno indeks sezonowości, jak i pora koncentracji wydajności źródeł należących do wszystkich trzech typów źródeł są ze sobą skorelowane ($r = 0,31\text{--}0,55$), natomiast w przypadku źródeł szczelinowych i porowych wyraźna jest ich zależność od wysokości wypływu ($r = 0,46\text{--}0,85$).

W grupie wypływów krasowych związek taki jest nieistotny statystycznie, bowiem drogi zasilania wywierzyisk są na ogół skomplikowane i często prowadzą wodę z dużych odległości (i wysokości); rzędna ujścia wody podziemnej na powierzchnię często nie ma więc związku z rzeczywistymi warunkami zasilania niwalnego czy nawet lodowcowego. Niektóre wywierzyiska (np. Gollinger Wasserfall – wypływ na wysokości 555 m n.p.m.) odwadniają duże skrasowiałe masywy, których wierzchołki sięgają ponad 2500 m n.p.m.

W grupie źródeł szczelinowych odnotowano istotną dodatnią zależność ($r = 0,73$) pomiędzy wysokością wypływu a jego średnią wieloletnią wydajnością (Q). Oznacza to, że ilość wody wypływająca z wyżej położonych źródeł jest większa. Po części można by to tłumaczyć wyższą średnią rzędną (801 m n.p.m.) obfitszych źródeł austriackich i niemieckich ($Q = 11,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) i niższym położeniem (średnio 523 m n.p.m.) mniej wydajnych źródeł czeskich ($Q = 2,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Jednak w obu grupach związek ten ma zupełnie odmienny kierunek – wydajność szczelinowych źródeł czeskich wyraźnie maleje ($r = -0,51$) wraz ze wzrostem wysokości. Wydaje się to uzasadnione, bowiem przy stosunkowo niewielkiej wysokości bezwzględnej obszaru źródła wyżej położone otrzymują wprawdzie więcej opadów, ale drenują równocześnie uszczelinioną strefę o potencjalnie mniejszej miąższości. Podobna jak w przypadku wypływów Austrii i Bawarii zależność cechuje także polskie źródła szczelinowe ($r = 0,53$). Trzeba jednak odnotować, że największą wagę w tym związku ma najwyżej położone i najobfitsze źródło w Zakopanem-Capkach – z jego pominięciem korelacja staje się nieistotna, więc analogiczna interpretacja nie znajduje uzasadnienia.

PODSUMOWANIE

Analiza wydajności źródeł badanych w latach 2003–2014 wskazuje na znaczne zróżnicowanie sezonowe ilości wypływającej wody, zależne nie tylko od warunków zasilania, ale przede wszystkim od ich typu hydrogeologicznego i położenia. Wypływy okresowe nie występują wśród zbadanych źródeł porowych, które cechuje największa stabilność wydajności. Znacznie większą zmiennością charakteryzuje się wydajność źródeł szczelinowych, a także krasowych. Natomiast różnica w wielkości wypływu nie ma istotnego znaczenia dla sezonowości wydajności – zarówno małe, jak i większe źródła mogą charakteryzować się dużą lub niewielką sezonowością wydajności i podobnym lub zróżnicowanym terminem jej koncentracji. Cechy te są natomiast zależne od wysokości wypływu – źródła położone na większej wysokości bezwzględnej mają wyższy indeks sezonowości i późniejszą porę koncentracji wydajności.

Źródła Polski od wielu lat są przedmiotem badań prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych, jednak stopień rozpoznania krenologicznego kraju pozo-

staje zróżnicowany. Systematyczne pomiary wydajności źródeł dostarczają danych nie tylko o wielkości wypływu, ale umożliwiają bardziej zaawansowane analizy wpływu warunków meteorologicznych i reakcji środowiska geologicznego. Warto przy tym zwrócić uwagę na fakt, że punktowy drenaż wód podziemnych ma znaczenie dla bilansu wodnego zlewni i struktury odpływu, zwłaszcza w zlewniach o dużym udziale zasilania podziemnego.

SUMMARY

In this paper the mean monthly discharges of several dozen springs from Poland were presented. The analyzes were based on multiannual discharge of groundwater outflows. Three variability coefficients were used: V – according to Meinzer, R – according to Maillete and C_v – classic variability coefficient. Also the Markham's seasonality parameters were counted: seasonality index and time of concentration. The results were interpreted with reference to the basic types of hydrogeological outflows: fissure and porous, their location and discharge recession pace. The regime in half of investigated springs is complex, and the nival-pluvial regime supply dominates over simple regimes with precipitation supply. The culmination of the discharge of outflows was observed in spring between the beginning of March and mid-July, depending on their location and supply conditions. The fissure spring are characterized by higher seasonal discharge – their seasonality index is several times lower than the fissure ones. Seasonal spring discharge was found to be well correlated with the spring altitude – the discharge of higher located springs is characterized by greater seasonal variability and later concentration date. On this occasion the role of meteorological and hydrogeological conditions in shaping of springs discharge were shown. For comparison the analogical characteristics of selected springs from other hydrogeological regions (Eastern Alps, Czech Massif) were presented.

LITERATURA

- Barczyk G., 2008: *Wýwierzyska tatrzańskie. Krasowe systemy wýwierzyskowe Tatr Polskich*, TPN, Zakopane, 1–178.
- Humnicki W., 2012: *Analiza recesji wydatku źródeł pienińskich w świetle obserwacji limnometrycznych*, Pieniny – Przyroda i Człowiek, 12, 13–31.
- Jokiel P., 1994: *Wieloletnie i sezonowe zmiany wydajności wybranych źródeł Polski*, Wiad. IMGW, 18 (38), 4, 117–130.
- Jokiel P., 1996: *Wzorcowe krzywe wysychania i potencjały zasobności kilkunastu źródeł karpackich*, Wiad. IMGW, 19 (40), 2, 67–77.
- Kresič N., Stefanowič Z., 2009: *Groundwater Hydrology of Springs*, Butterworth-Heinemann, 1–592.
- Křiž H., 1973: *Processing of Results of Observations of Spring Discharge*, Ground Water, 11, 5, 1–14.
- Małeczka D., 1997: *Źródła masywu tatrzańskiego*, Acta Univ. Lodz., Folia Geogr. Phys., 2, 9–26.
- Markham C. G., 1970: *Seasonality of precipitation in The United States*, Ann. Assoc. Am. Geographers, 60, 3, 593–597.
- Michalczyk Z., Turczyński M., 1999: *Charakterystyka hydrologiczna źródeł w Wąwolnicy na Wyżynie Lubelskiej*, Annales UMCS, sec. B, 54, 217–234.
- Moniewski P., 2004: *Źródła okolic Łodzi*, Acta Geogr. Lodz., 87, 1–140.

- Moniewski P., 2014: *Sezonowe zmiany wybranych cech fizyczno-chemicznych wód małej rzeki podmiejskiej na przykładzie Dzierżącej*, Monogr. Komit. Gosp. Wod. PAN, 20, Warszawa, 407–416.
- Moniewski P., 2015: *Seasonal variability of discharge from selected springs in central Europe*, Episodes, 38, 3, 189–196.
- Rocznik Hydrogeologiczny Państwowej Służby Hydrogeologicznej, 2003–2011*, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Siwek J., Baścik M. (red.), 2013: *Przyrodnicze i antropogeniczne przemiany źródeł Wyżyn Krakowsko-Wieluńskiej i Miechowskiej oraz ich rola w krajobrazie naturalnym i kulturowym*, IGiGP UJ, Kraków, 1–317.
- Tomalski P., Tomaszewski E., 2015: *Metody, formuły i wzory obliczeniowe zastosowane w pracy*, [w:] P. Jokieli (red.), *Metody statystyczne w analizach hydrologicznych środkowej Polski*, Wyd. UŁ, Łódź, 215–271.