

◆◆◆◆ ORIGINALNE PRACE ◆◆◆◆ I PRZYZYNY

Krzysztof M. KOZUCHOWSKI
Uniwersytet Łódzki

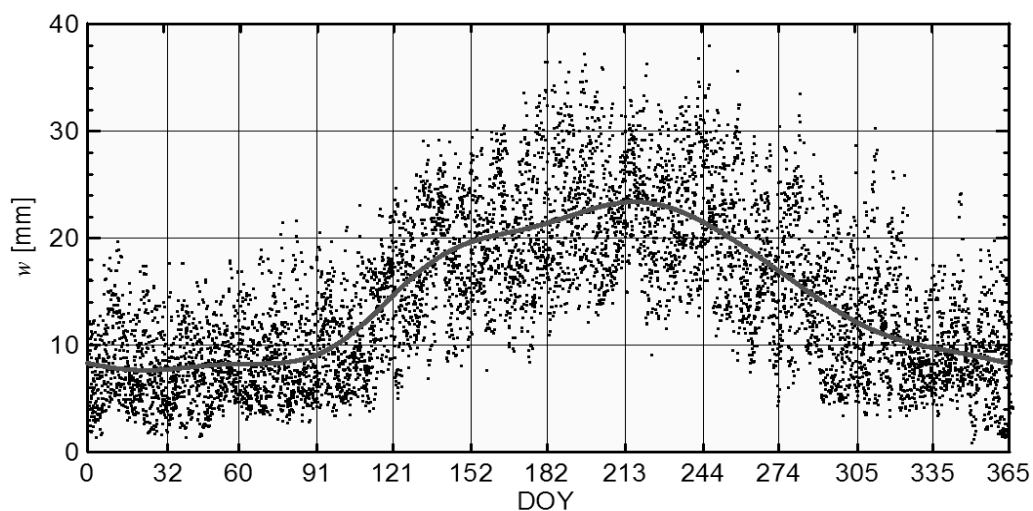
ZAWARTOŚĆ WODY OPADOWEJ W ATMOSFERZE I OPADY W POLSCE

ATMOSPHERIC PRECIPITABLE WATER AND PRECIPITATIONS IN POLAND

Wielkość, określana jako zawartość wody opadowej w atmosferze (*precipitable water*), staje się w ostatnich latach coraz częściej wykorzystywana w polskich badaniach klimatologicznych. K. Fortuniak (2003) jako pierwszy przedstawił obraz rocznego cyklu zmian zawartości wody opadowej nad Polską Środkową¹. Maksimum tego cyklu przypada na pierwszą dekadę sierpnia, najniższe wartości utrzymują się w styczniu, lutym i marcu, a średnią roczną wartość reprezentuje słup wody opadowej o wysokości ok. 15 mm (rys. 1).

Malinowska i Miętus (2010) zawartość wody opadowej uznali za jeden z czynników warunkujących powstawanie opadów o dużym natężeniu w Gdyni. Stwierdzili jednakże występowanie tych silnych opadów przy wysokiej, ale mocno zróżnicowanej zawartości wody opadowej w atmosferze; opadom o dużym natężeniu najczęściej towarzyszy zawartość wody opadowej w granicach 28,1-32 mm, a jej wartości bliskie maksymalnym (>36 mm) zdarzają się z częstością niewiele większą od wartości równych i niższych od średniej rocznej zawartości wody opadowej nad Polską (tab. 1).

¹ Jednym z pierwszych (lub pierwszym) doniesieniem na ten temat był artykuł: Hay J.E., 1970 *Precipitable water over Canada*. Atmosphere, 8, 128-143.



Rys. 1. Roczny przebieg zawartość wody opadowej w atmosferze (w w mm) nad Polską Środkową w latach 1993-1997, wg Fortuniaka (2003). Kropki – wartości zmierzone w terminach co 6h, linia ciągła – suma 5 najsilniejszych składowych harmonicznich, na osi poziomej – kolejne dni roku (DOY)

Fig. 1. Annual course of amount of precipitable water in the atmosphere (w in mm) over middle Poland in period 1993-1997, acc. Fortuniak (2003). Dots – records from observations in 6-hours intervals, line – sum of 5 harmonic components, on the abscissa – days of the year

Tabela 1. Rozkład zawartości wody opadowej w atmosferze (PW) związanej z opadami o dużym natężeniu w Gdyni, wg Malinowskiej i Miętusa (2010)

Table 1. Distribution of amount of precipitable water in the atmosphere (PW) connected with heavy precipitations in Gdynia, acc. Malinowska and Miętus (2010)

PW [mm]	12,1-16	16,1-20	20,1-24	24,1-28	28,1-32	32,1-36	>36
Częstość [%]	9,6	13,5	15,4	13,5	23,1	11,5	13,5

Bernas i Kolendowicz (2013) stwierdzili, że wysokość maksymalnych opadów w Poznaniu jest ściśle związana ze średnią zawartością wody opadowej w atmosferze, ale pokazali jednocześnie, iż najwyższe opady występują w sytuacjach, kiedy zawartość wody opadowej nie jest zbyt duża (17 mm przy opadach powstających w zatoce niżu znad Wielkiej Brytanii lub 24 mm przy opadach związanych z aktywnością niżu z centrum nad południową Polską).

Świątek (2013) zauważyła, że opady nawałne mogą wielokrotnie przewyższać aktualną zawartość wody opadowej. Suligowski (2013) przewyższenie to nazywa „współczynnikiem efektywności układu”; według tego autora stosunek wysokości maksymalnych opadów dobowych w rejonie Kielc do słupa wody opadowej w atmosferze osiąga wartość 3,23. Stach (2009) wykazał, że maksymalne opady dobowe w Polsce, także w nizinnej części kraju, charakteryzującej się względnie skąpyimi opadami, osiągają co najmniej 80 mm. To oznacza, że są one

dwukrotnie większe od maksymalnej zawartości wody opadowej w atmosferze, która tylko nieznacznie przekracza wartość 40 mm.

Stosunek średnich miesięcznych sum opadów do średniej zawartości wody opadowej nad Polską waha się w granicach od 2,2 we wrześniu do 3,2 w lutym, natomiast iloraz miesięcznych średnich obfitości opadów (tj. sumy opadów przypadającej na 1 dzień z opadem) i średnich zawartości wody opadowej utrzymuje się w ciągu roku na mniej więcej stałym poziomie i wynosi $0,219 \pm 0,0026$ (Kozuchowski, 2015). Ten wniosek zweryfikowano w niniejszym opracowaniu na podstawie bardziej szczegółowych danych opadowych.

Średnia zawartość wody opadowej w atmosferze nad Polską (ok. 15 mm, czyli 15 kg/m^2) stanowi $1/40$ część rocznej sumy opadów, co oznacza, że średni cykl wymiany wody atmosferycznej trwa 9,1 dnia; jest to czas zbliżony do trwania cyklu wymiany wody w atmosferze Ziemi, który określono na 11 dni (O'Neill, 1997, str. 64). Głównym czynnikiem obiegu wody w atmosferze nad Polską, poza opadami i parowaniem, jest cyrkulacja atmosferyczna, dzięki której kształtuje się poziomy strumień transportu pary wodnej. Według L e n a r t a (1983) średnia gęstość strumienia pary wodnej, przenoszonej nad obszar Polski na ogół z zachodu lub z południa, zmienia się od $60\text{--}70 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ w styczniu do ponad $100 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ w lipcu.

Sobik i Błaś (2010) wykazali, że najwyższe opady powstają przy silnej konwergencji i dużych prędkościach wiatru ponad warstwą graniczną atmosfery. Takie warunki panują w aktywnym i przemieszczającym się niezbyt szybko niżu, w atmosferze charakteryzującej się silnie zaznaczoną chwiejnością baroklinową (por. też Ziemiański, 2002). Nasuwa się więc wniosek, że powstawanie opadów o dużym natężeniu uwarunkowane jest dostateczną zawartością wody opadowej w atmosferze, ale przede wszystkim układem cyrkulacyjnym, który zapewnia ciągły dopływ i kondensację pary wodnej, a w konsekwencji umożliwia powstawanie opadów, przewyższających aktualną zawartość wody w atmosferze. Układ taki kształtują głównie fronty atmosferyczne, z którymi związana jest większość ($2/3$) najwyższych opadów w Polsce (Łupikasa, 2010). Rozbudowane chmury konwekcyjne, towarzyszące frontom chłodnym lub formujące się w brzdach niskiego ciśnienia, nad obszarami aktywnymi termicznie, są wyrazem funkcjonowania tego rodzaju procesów (Suligowski, 2013).

Obszerną pracę o zawartości wody opadowej w atmosferze nad Europą oraz wieloletnich trendach tej wielkości opublikowali Wibig i Siedlecki (2007). Określono w niej m.in. zakres zmienności średniej miesięcznej zawartości wody opadowej nad Polską (od 7 do ponad 25 mm) i stwierdzono jej tendencję malejącą w okresie 1973–2005.

W literaturze polskiej funkcjonują rozmaite odpowiedniki określenia *precipitable water*: „woda opadowa” (Niedźwiedź, 2003), „grubość skondensowanej pary wodnej” (Fortuniak, 2003), „zawartość wody opadowej” (Wibig, Siedlecki, 2007), „zapas wody opadowej (PrecWat)” (Malinowska, Miętus, 2010), „opad potencjalny,

(PP)” (Magnuszewski, Soczyńska, 2001; Suligowski, 2013), „wskaźnik dostępnej wody opadowej (pw)” (Bernas, Kolendowicz, 2013). Krótką dyskusję na temat tych terminów zamieszczono w artykule o obfitości opadów w Polsce (Kożuchowski, 2015). Warto tu dodać, że według AMS Glossary (2012) równoznacznymi terminami są *precipitable water* oraz *precipitable water vapour*.

Rozważając znaczenie różnych spotykanych odpowiedników terminu *precipitation water/precipitable water vapor*, zdecydowano w niniejszym tekście pisać dalej o „zawartości wody opadowej w atmosferze”, używając także akronimu PW.

Cele i materiał opracowania

Głównym celem niniejszej pracy jest określenie relacji między opadami w Polsce i zawartością wody opadowej w atmosferze. Przedstawiono próbę odpowiedzi na pytanie o związek wysokości opadów z zawartością wody atmosferycznej, które rozpatrzono w dwu aspektach: 1) zbadano związki średnich wartości PW i charakterystyk pluwiometrycznych w przebiegu rocznym, 2) określono wartości PW, odpowiadające maksymalnym sumom opadów dobowych ($P_{\max}$), notowanych na obszarze Polski.

Praca może stanowić przyczynek do bardziej szczegółowego poznania rocznego rytmu zmian warunków higroklimatycznych w Polsce. Służą temu wykorzystane wartości pentadowe, które umożliwiają dokładniejszą od zwykle używanych wartości miesięcznych prezentację właściwości tego rytmu.

W rocznym rytmie ujawnia się czynnik termiczny, determinujący zarówno sezonowe zmiany wysokości i obfitości opadów, jak i zmiany zawartości wody opadowej w atmosferze. Stosunek obfitości opadów do PW odzwierciedla natomiast wydajność procesów opadotwórczych (*precipitation efficiency*, wg Bordi i in., 2016). Opady maksymalne i odpowiadające im wartości PW określają możliwe rozmiary wzrostu tej wydajności, uwarunkowane, jak wspomniano we wstępie, czynnikami cyrkulacyjnymi: adwekcją i konwergencją strumieni pary wodnej, konwekcją, a także ukształtowaniem podłoża atmosfery.

W prezentowanym opracowaniu wykorzystano dobowe sumy opadów oraz częstość dni z opadem w 21 stacjach meteorologicznych w Polsce w okresie 1958–2008. Lista tych stacji znajduje się w tab. 2, zamieszczonej w artykule o obfitości opadów (Kożuchowski, 2015). Zestawiono także pochodzące z reanaliz NCEP/NCAR dobowe wartości PW, reprezentujące średnią zawartość wody opadowej w atmosferze nad obszarem Polski na podstawie wartości PW z punktów o współrzędnych 20° E i 22,5° E na równoleżniku 50° N oraz 15° E, 17,5° E, 20° E i 22,5° E na równoleżniku 52,5° N.

Zbiór danych pochodzących z reanalizy, mimo pewnych zastrzeżeń, uznano z konieczności za wiarygodną ocenę zawartości wody opadowej nad Polską

w analizowanym okresie. Za uzasadnienie mogą w tym zakresie posłużyć wnioski sformułowane przez Wibig i Siedleckiego (2007), którzy stwierdzili m.in. zgodność danych o zawartości wody opadowej otrzymywanych w wyniku reanaliz NCEP/NCAR z wynikami analizy radiosondaży atmosfery, które należy uznać za podstawowe źródło danych o profilu wilgotności właściwej powietrza, niezbędnych do określenia masy słupa wody w atmosferze. Różnice średnich miesięcznych wartości PW z porównywanych źródeł „rzadko przekraczają 1 kg m^{-2} ”. W konkluzji cytowani autorzy stwierdzają, że „dane z reanaliz, ze względu na swoją kompletność i gęstość, dobrze nadają się do opisu czasowego i przestrzennego rozkładu zawartości wody opadowej w atmosferze” (Wibig, Siedlecki, 2007, str. 199). Także Bordi i in. (2016) stwierdzili dobrą zgodność danych pochodzących z reanaliz i danych z bezpośrednich pomiarów (w tym przypadku GPS). Badając zawartość wody opadowej nad obszarem USA, nie stwierdzono różnic porównywanych wartości PW większych od 4 mm.

Wykorzystane w niniejszym opracowaniu dane z reanaliz NCEP/NCAR prowadzą do ustalenia dla obszaru Polski średnich wartości PW zgodnych z przedstawionymi na rys. 1 wartościami PW według Fortuniaka (2003), który wykorzystał pomiary naziemne do oceny PW nad Polską Środkową. Porównywalne maksima PW sięgają w obu zbiorach do ok. 40 mm.

W analizie rocznego przebiegu opadów i zawartości wody opadowej wykorzystano średnie 5-dniowe ich wartości. Pentadowe średnie uważane są za szczególnie przydatne w określaniu zmienności sezonowej opadów, bowiem „...okres ten (pięciodobowy) odpowiada w przybliżeniu naturalnym okresom synoptycznym.” (Twardosz, 2000, s. 24/25). Obliczono wieloletnie średnie dobowe i średnie pentadowe sumy opadów (P5), częstość dni z opadem (F5) i obfitość opadów ($DP = P5/F5$) w pentadach, średnie wartości dobowe i pentadowe zawartości wilgoci w atmosferze (PW) oraz ilorazy DP/PW . Określono korelacje wymienionych zmiennych w przebiegu rocznym oraz ich składowe harmoniczne. W tekście artykułu przedstawiono przede wszystkim uśrednione na obszarze Polski wysokości opadów oraz uśrednione częstości dni z opadem (średnie arytmetyczne z 21 stacji).

Średnie obszarowe zacierają wprawdzie obraz zróżnicowania przestrzennego opadów na obszarze kraju, ale zarazem umożliwiają ich porównanie ze średnimi wartościami PW, obliczonymi z 6 wyszczególnionych wcześniej punktów gridowych. Wobec niewielkiego na ogół zróżnicowania wartości PW w swobodnej atmosferze, średnie z 6 punktów gridowych uznano za wskaźnik dostatecznie dobrze estymujący rzeczywistą zawartość wody w atmosferze nad obszarem Polski.

Wskutek uśrednienia uchodzą uwadze przypadki skrajnych wartości sum opadów i wartości PW. Według Suligowskiego (2013) zawartość wody opadowej w Polsce może sięgać do 60 mm, to jest do wartości stanowiącej 140% najwyższej średniej PW z wykorzystywanego w niniejszym opracowaniu zbioru danych. Nie można wykluczyć, że wyniki z reanaliz są szacowane z niedomiarem lub że

występują być może lokalne maksima PW, tak znacznie różniące się od średnich z całego obszaru Polski.

W wilgotnych masach powietrznych, napływających nad obszar Polski wskutek działalności niżów śródziemnomorskich i przynoszących często ekstremalnie wysokie opady, średnia zawartość wody opadowej wynosi 18 mm, a jej maksymalne wartości sięgają 37 mm (Degirmendzić, Kożuchowski, 2017). Maksima te są więc bliskie najwyższym wartościom PW w rozpatrywanym zbiorze danych. Również Świątek (2013) określa podobną najwyższą zawartość wody opadowej w atmosferze w czasie obfitych opadów w Polsce.

W drugiej części artykułu analizowano związki między maksymalnymi opadami dobowymi w Polsce i zawartością wody opadowej w atmosferze. Wykorzystując dane z 66 stacji meteorologicznych, wybrano najwyższe dobowe sumy opadów z okresu 1958-2008, uwzględniając warunek, by każda z tych sum wystąpiła różnym terminie. Spośród sum występujących tego samego dnia wybrano sumę najwyższą. Tak sporządzoną listą opadów uzupełniono, wybierając wyższe od figurujących w pierwszym zestawieniu opady, których wartości ustalono na podstawie dostępnej literatury przedmiotu badań. Wykorzystano najwyższe sumy dobowe opadów w wielu różnych miejscowościach, wymieniane w pracach: Bogucka (1998), Cebulak (1992), Cebulak, Pyrc (2006), Grela i in. (1997), Kłysik, Fortuniak (1993), Majewski i in. (2010), Niedźwiedź (2003), Prokop (2006), Rzepa (2004), Siwek (2010), Skowera, Wojkowski (2003), Ustrnul, Czekerda (2009), Twardosz (2007), Woś (1994). Wybrano w rezultacie 100 wysokich sum dobowych opadu. Wśród tych sum znajduje się 9 przypadków opadu o wysokości ponad 200 mm, 47 przypadków opadu 100-200 mm oraz 44 wartości opadów niższych od 100 mm.

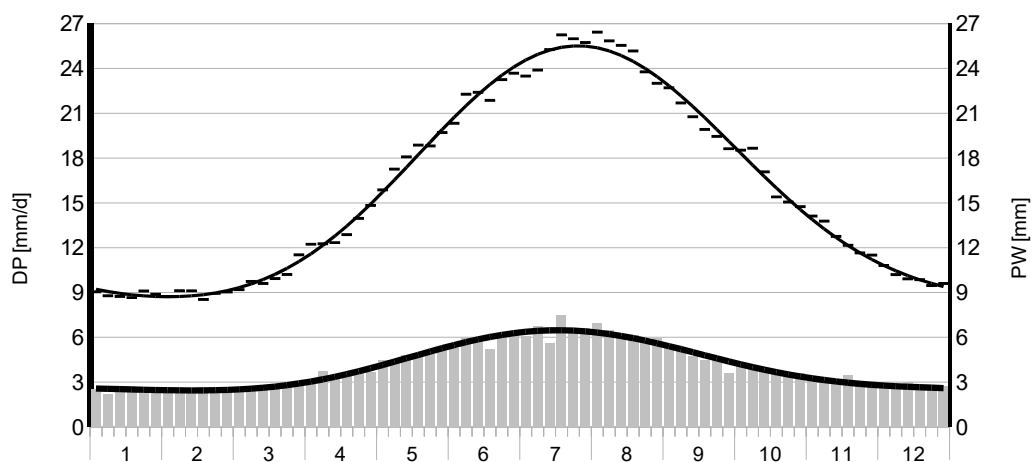
Ustaloną listę najwyższych opadów dobowych otwierają najwyższe opady zanotowane na Hali Gąsienicowej 30 VI 1973 (300 mm), na Laskowcu 18 VII 1970 (243 mm) i ponownie na Hali Gąsienicowej 8 VII 1997 (224 mm). Na końcu listy znajdują się dobowe sumy opadów, które wystąpiły w Świnoujściu 29 VIII 1969 (59 mm), w Legionowie 27 VII 1972 (69 mm) i w Pile 9 VI 1990 (76 mm).

Średnie roczne cykle opadów i zawartości wody opadowej

Zawartość wody opadowej w atmosferze nad Polską oraz sumy i obfitość opadów atmosferycznych podlegają sezonowej zmienności – wykazują roczny rytm, w znacznym stopniu określony przez składowe harmoniczne. W rytmach tych zaznaczają się wyraźne maksima letnie i minima zimowe. Mniej regularne okazują się zmiany w ciągu roku częstości opadów oraz współczynnika efektywności wykorzystania wody opadowej DP/PW. Obie te miary (F5 i DP/PW) wykazują charakterystyczne przyrosty w połowie listopada (w pentadzie 16-20 XI). Można je

powiązać z przypadającym w tym samym terminie początkiem sezonu panowania w Polsce typów pogody „zimowej”, z przewagą dni z opadami oraz dużą częstością pełnego zachmurzenia (sezon „C” wg Wosia, 1996), albo nawet z „początkiem roku meteorologicznego”, którego termin, według dawnych spostrzeżeń Pietkiewicza (1889), wypada 1 grudnia.

Najniższa średnia zawartość wody opadowej w atmosferze (8,53 mm) przypada na 4. pentadę lutego (średnie minimum dobowe PW=7,97 mm występuje 17 II). Najwyższa średnia pentadowa (26,43 mm) wypada na początku sierpnia (1-5 VIII), maksimum dobowe (PW=27,10 mm) występuje 3 VIII. Roczny cykl zmian PW najlepiej opisuje pierwsza składowa harmoniczna o cyklu rocznym: wyjaśnia ona 92% wariancji średnich wartości pentadowych PW (tab. 2, rys. 2).



Rys. 2. Roczny przebieg średniej pentadowej obfitości opadów w Polsce (DP w mm/doba, słupki) i średniej pentadowej zawartości wody opadowej w atmosferze (PW w mm, kreski) oraz ich składowe harmoniczne

Fig 2. Annual courses of the averages of 5-days precipitation abundance in Poland (DP in mm/day, columns) and 5-days amount of precipitable water in the atmosphere (PW in mm, dashes) and their harmonic components

Średnie pentadowe sumy opadów w Polsce w ciągu roku wahają się od 5,8 mm w końcu lutego do 19,9 mm w połowie lipca (16-20 VII). Roczna składowa harmoniczna wyjaśnia 87% wariancji sum pentadowych, które zarazem są ściśle skorelowane z pentadowymi wartościami PW (współczynnik korelacji $r=0,90$, tab. 2).

Częstość dni z opadem ma minimum na początku sierpnia (39,7% dni z opadem w okresie 6-10 VIII), maksimum występuje w drugiej połowie listopada i osiąga wartość 65% dni z opadem w dniach 16-20 XI. Na roczne wahania częstości dni z opadem składają się cykle roczny i półroczny, które jednak wyjaśniają tylko 42% zmienności F5. Roczny przebieg częstości dni z opadem kształtuje

się odmiennie względem znacznie bardziej regularnych zmian zawartości wody opadowej w atmosferze; współczynnik korelacji F5 i PW wynosi -0,55 (tab. 2.).

Tabela 2. Średnie, minimalne i maksymalne wartości pentadowe sumy opadów (P5), częstości dni z opadem (F5), obfitości opadów (DP), zawartości wody w atmosferze (PW), ilorazy DP/PW oraz udział składowych harmonicznnych w ich przebiegu rocznym i korelacja z zawartością wilgoci (wartości średnie z 21 stacji na obszarze Polski w okresie 1958-2008)

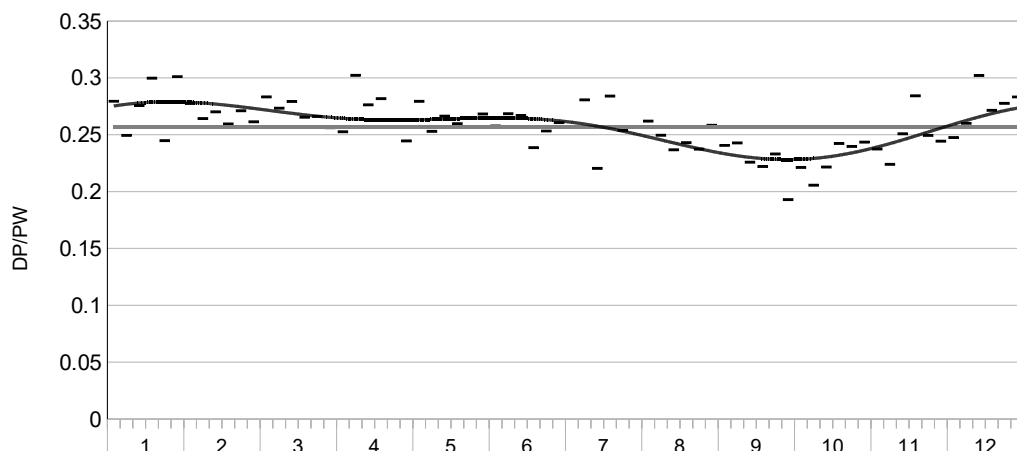
Table 2. Averages, minima and maxima of 5-days sums of precipitation (P5), frequency of days with precipitation (F5), abundance of precipitation (DP), precipitable water in the atmosphere (PW), ratios DP/PW, percent of variance represented by harmonic components and correlation with PW values (averages from 21 weather stations in Poland, 1958-2008)

Miary	Średnia	Minimum		Maksimum		Składowe cykliczne* [%]	Współcz. korelacji z PW
		wartość	pentada	wartość	pentada		
PW [mm]	15,93	8,53	16-20 II	26,43	1-5 VIII	92	1,00
P5 [mm]	9,91	5,75	26-28 II	19,91	16-20 VII	87	0,90
F5 [%]	48,69	39,7	6-10 VIII	65,0	16-20 XI	42	-0,55
DP[mm/d.]	4,04	2,19	6-10 I	7,46	16-20 VII	80	0,97
DP/PW	0,257	0,193	26-30 IX	0,302	6-10 IV	32	-0,40

* procent zmienności rocznej (wariancji wartości pentadowych) wyjaśniony przez dwie pierwsze harmoniki (cykl roczny + półroczny).

Obfitość opadów ma wyraźnie zaznaczony cykl roczny. Najniższa średnia wartość DP przypada na początek stycznia (2,2 mm/dobę w dniach 6-10 I), najwyższa (7,5 mm/dobę) współwystępuje z maksimum sum pentadowych w dniach 16-20 VII. Obfitość opadów jest najściślej skorelowana z zawartością wody w atmosferze – współczynnik korelacji wartości pentadowych wynosi 0,97 (tab. 2, rys. 2).

Średnia roczna wartość ilorazu DP/PW, określającego stopień wykorzystania wody atmosferycznej w powstawaniu opadów, wynosi 0,26 i jest nieco wyższa od wcześniej wyznaczonej średniej (0,21), obliczonej według miesięcznych wartości DP i PW (Kożuchowski, 2015). Uwzględnienie pentadowych wartości DP i PW wykazuje ponadto, że ich ilorazy podlegają charakterystycznym zmianom sezonowym. Najniższe wartości DP/PW występują w jesieni (średnia w dniach 26-30 X wynosi 0,19), najwyższe pojawiają się wiosną (średnia w dniach 6-10 IV wynosi 0,30). Jesienne minimum zaznacza się najwyraźniej, zwłaszcza że występuje zaraz przed charakterystycznym przyrostem wartości DP/PW w połowie listopada. W pentadzie 16-20 XI obserwuje się zarówno przyrost wysokości sum opadów dobowych, jak i wzrost częstości dni z opadem, a iloraz DP/PW przekracza wartość średniej rocznej. Względnie wysokie, na ogół przekraczające średnią roczną wartość DP/PW, utrzymują się w ciągu całej zimy oraz wiosną i latem – do końca lipca (rys. 3).



Rys. 3. Roczny przebieg stosunku obfitości opadów w Polsce do zawartości wody opadowej w atmosferze (DP/PW) – średnie wartości w pentadach (kreski) oraz główne składowe harmoniczne
 Fig. 3. Annual course of ratio of precipitation abundance to precipitable water amount (DP/PW) – averages in 5-days periods (dashes) and its harmonic component

Stosunek obfitości opadów do zawartości wody opadowej w atmosferze wykazuje słabo zaznaczoną okresowość półroczną. Wykazuje też niezbyt silną negatywną korelację z zawartością wody w atmosferze (PW), która w dużym stopniu odzwierciedla odwrotnie proporcjonalną zależność DP i DP/PW.

Zmiany roczne ilorazu DP/PW odzwierciedlają względne przesunięcie faz cyklu DP, którego maksimum wypada w połowie lipca, i cyklu PW, z maksimum na początku sierpnia. Zawartość wody opadowej odznacza się pewną bezwładnością, wynikającą ze stopniowego gromadzenia zapasu wody opadowej w ciągu sezonu ciepłego, obfitość opadów natomiast bezpośrednio podlega oddziaływaniom warunków termicznych i osiąga maksimum w najcieplejszym okresie roku. Po letnich maksimach obfitość opadów maleje szybciej niż zawartość wody w atmosferze, co oznacza też spadek ilorazu DP/PW.

Poszczególne charakterystyki pluwiometryczne wykazują zróżnicowanie rocznego rytmu opadów na obszarze kraju, pozostające m.in. w związku ze zróżnicowaniem stopnia kontynentalizmu pluwialnego. Roczny przebieg opadów w Polsce zmienia się w przekroju południkowym kraju – z południa na północ ulega opóźnieniu faza cyklu rocznego, amplitudy rocznego cyklu maleją natomiast w kierunku NW (Kozuchowski, Wibig, 1988). Zmian tych nie ujawniają oczywiście przedstawione wyżej uśrednione miary opadowe w całego obszaru kraju („średnie obszarowe”). Dane zamieszczone w tab. 3 stanowią uproszczone uzupełnienie obrazu geograficznego zróżnicowania rocznego przebiegu opadów w Polsce; przedstawiono je na tle średniego rocznego przebiegu pentadowych wartości PW.

Tabela 3. Średnia zawartość wody opadowej w atmosferze nad Polską (wartości pentadowe PW5) oraz występowanie maksimów i minimów rocznego przebiegu pentadowych sum opadów (P5), częstości opadów (F5) i obfitości opadów (DP5) w 21 stacjach w Polsce

Cyfry oznaczają liczbę stacji, kursywa – minima, pogrubiona czcionka – maksima, * – maksima i minima średniego przebiegu opadów na obszarze Polski (średnie z 21 stacji)

Table 3. Averages of amount of precipitable water in the atmosphere over Poland (5-days means, PW5) and the occurrence of maxima and minima of 5-days precipitation totals (P5), precipitation frequency (F5) and abundance of precipitation (DP5) in the annual course in 21 weather stations in Poland
Ciphers – number of weather station, italics – minima, bold – maxima, * – minima and maxima averaged for the area of Poland (averages from 21 stations)

Pen- tady	miesiące											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
PW5 [mm]												
1	9,0	8,7	9,2	12,2	15,9	20,3	23,5	26,4	22,7	18,5	14,1	10,8
2	8,8	9,1	9,7	12,3	17,3	22,3	23,9	25,8	21,7	18,7	13,8	10,2
3	8,7	9,1	9,6	12,3	18,1	22,4	25,3	25,5	20,8	17,1	12,8	9,9
4	8,7	8,5	9,9	12,9	18,9	21,9	26,3	25,2	19,9	15,4	12,2	9,9
5	9,1	8,9	10,2	14,0	18,8	23,3	26,0	23,8	19,5	15,1	11,6	9,5
6	8,9	9,0	11,5	14,8	19,7	23,7	25,7	23,0	18,6	14,7	11,5	9,6
P5												
1								3	1			
2	<i>1</i>						1					
3	2					1						
4		<i>1</i>					8*					
5	<i>1</i>	6	3			1	1					
6		<i>6*</i>				3		2		1		
F5												
1	3					3		<i>1</i>	<i>1</i>			
2						2		<i>1*</i>		2		
3				<i>1</i>						<i>1</i>		4
4									<i>1</i>		13*	1
5				<i>2</i>	<i>3</i>							
6							<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>			
DP5												
1	<i>1</i>	2					1	2				<i>1</i>
2	<i>6*</i>		<i>1</i>				2	3	1			
3	<i>1</i>	<i>1</i>				1	1					
4							4*					
5	<i>4</i>	3					5					
6		<i>1</i>					1					

Maksima sum pentadowych opadów na największej liczbie stacji (8) przypadają na 4. pentadę lipca, zgodnie z maksimum średniej wartości krajowej. Najwcześniejsze maksima pojawiają się miejscami już w czerwcu (Suwałki, Olsztyn, Świnoujście, Zakopane i Kasprowy Wierch). Najpóźniej, na początku września, maksymalna wartość sumy opadów występuje w Łebie, w końcu sierpnia – w Gdyni i Koszalinie, na początku sierpnia – w Białymstoku, Terespolu i Lublinie. Najwyższą średnią sumę pentadową wykazuje Kasprowy Wierch (43,4 mm), najniższe maksimum stwierdzono w Gdyni (12,6 mm).

Minima średnich sum pentadowych przypadają w większości stacji na drugą połowę lutego, 3 przypadki minimów odnotowano w marcu (21-25 III) – na Śnieżce, w Zielonej Górze i Poznaniu, 4 – przypadki w styczniu – w Zakopanem, Bielsku, Rzeszowie i Kole. Osobliwym, choć być może charakterystycznym, terminem minimum opadów jest ostatnia pentada października, z najniższą sumą opadów na Kasprowym Wierchu (14,4 mm).

Wśród minimów rocznych najniższe sumy mają Wrocław (3,0 mm/5 dni) oraz Poznań i Terespol (3,2 mm/5 dni).

Częstość dni z opadem wykazuje dominujące maksimum w drugiej połowie listopada (16-20 XI). Znalaziono je w seriach danych z 13 stacji. Kilka stacji ma maksimum częstości przypadające na grudzień, a kolejne 3 (Suwałki, Świnoujście i Rzeszów) mają maksimum na początku stycznia. Największa częstość opadów charakterystyczna jest dla Śnieżki (84% dni z opadem, tj. ponad 4 dni z opadem w pentadzie 16-20 XI), najniższe maksimum częstości (59%) znalaziono we Wrocławiu.

Najmniejsze częstości dni z opadem wykazują znaczne rozproszenie terminów wystąpienia. Pojawiają się w okresach od kwietnia do początków czerwca lub od końca lipca do połowy października. Średni krajowy termin – pentadę 6-10 VIII – reprezentuje tylko minimum notowane w Kole (34% dni z opadem). Najwcześniejsze wiosenne minimum częstości opadów mają Świnoujście, Wrocław i Terespol (kwiecień), najpóźniejsze – Jelenia Góra, Rzeszów i Zakopane (październik). Najmniejszą częstość (30% dni z opadem) odnotowano w Łebie w 2. pentadzie czerwca (6-10 VI). Na Śnieżce to minimum wynosi 53% i przypada na początek sierpnia (1-5 VIII).

Obfitość opadów ma roczne maksima skoncentrowane w lipcu, zwłaszcza w jego drugiej połowie. Wcześniejsze, przypadające na połowę czerwca, maksimum zanotowano w Olsztynie (6,5 mm/dobę w terminie 11-15 VI). Późniejsze maksima występują na początku sierpnia, a także we wrześniu – w Świnoujściu 7,0 mm/dobę w terminie 6-10 IX. Największą obfitością opadów wyróżnia się Kasprowy Wierch – 14,5 mm/dobę w terminie 21-25 VII. Najniższe maksimum obfitości opadów stwierdzono w Gdyni – 6,1 mm/dobę w terminie 11-15 VII.

Współczynnik efektywności DP/PW zmienia się proporcjonalnie do obfitości opadów; jego maksima osiągają najwyższe wartości w górach (0,84 na Kasprowym Wierchu, 0,56 na Śnieżce), w nizinnej części kraju wynoszą ok. 0,30. Średnia

roczna wartość ilorazu DP/PW waha się od 0,21 w Toruniu i Gdyni do 0,35 na Śnieżce i 0,52 na Kasprowym Wierchu. W górach średni opad dobowy stanowi połowę zawartości wody opadowej w atmosferze, na nizinach zaledwie 1/5 PW.

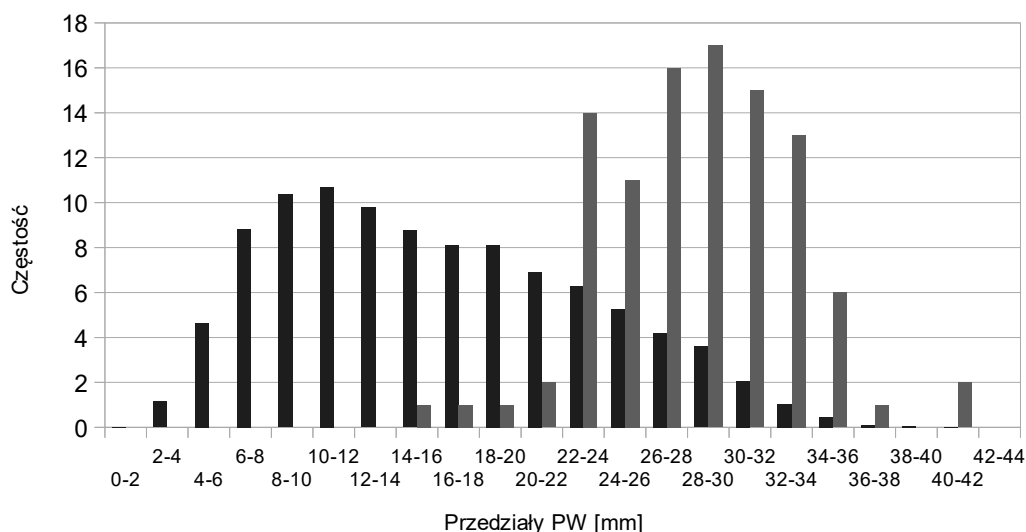
Występowanie w ciągu roku skrajnych pentadowych wysokości opadów oraz ich obfitości, mimo dość znacznej zmienności terminów, potwierdza istnienie proporcjonalnej zależności tych charakterystyk pluwiometrycznych od zawartości wody opadowej w atmosferze w przebiegu rocznym. Widoczne jest także przesunięcie faz rocznego przebiegu sum opadu i obfitości opadów, opóźnionych o 2-3 pentady względem fazy przebiegu PW. Częstość opadów natomiast zmienia się w ciągu roku w zasadzie niezależnie od zawartości wody w atmosferze; wyraźne maksimum F5 z połowy listopada, miejscami przesunięte także na grudzień i stycznia, przypada na okres malejących wartości PW. Charakterystycznemu przyrostowi częstości opadów w listopadzie towarzyszy systematyczny spadek wartości PW. Z kolei minima częstości, bardzo zmienne na obszarze kraju, pojawiają się w cieplej połowie roku, w sezonie względnie wysokiej zawartości wody w atmosferze. W rezultacie ujawnia się słaba negatywna korelacja częstości dni z opadem z zawartością wody opadowej w atmosferze (por. tab. 2).

Zawartość wody opadowej w atmosferze i maksymalne opady dobowe

Zawartość wody opadowej w atmosferze nad Polską charakteryzuje się prawostronnie asymetrycznym rozkładem częstości (rys. 4), a jej skrajne wartości w latach 1958-2008 zawierały się w przedziale $1,9 \text{ mm} \leq \text{PW} \leq 41,0 \text{ mm}$, przy średniej 15,9 mm.

Maksymalne opady dobowe ($P_{\max}$) są związane ze zróżnicowaną, ale na ogół wysoką, ponadprzeciętną zawartością wody opadowej w atmosferze. Rozkład częstości PW odpowiadających wystąpieniu maksymalnych opadów dobowych w Polsce (tj. wybranych 100 przypadków maksimów opadowych) wskazuje, że najczęściej maksymalne opady dobowe występowały przy zawartości wody opadowej w atmosferze określonej przez wartości $28 \leq \text{PW} \leq 30 \text{ mm}$, 95% opadów $P_{\max}$ wystąpiło przy wartościach $\text{PW} > 22 \text{ mm}$, ponad połowa – przy wartościach $\text{PW} > 28 \text{ mm}$. Rozkład ten wyróżnia się znamiennie na tle rozkładu charakteryzującego cały zbiór PW (rys. 4). Jest za to bardzo podobny do cytowanego (tab. 1) rozkładu wartości PW występujących przy dużych opadach w Gdyni (Malinowska, Miętus, 2010).

Średnia zawartość wody opadowej w atmosferze odpowiadająca maksymalnym opadom w Polsce wynosi 28,3 mm. Wraz ze wzrostem wysokości opadów maksymalnych następuje także przyrost średnich wartości PW. Przyrost ten jednak okazuje się zaskakująco niewielki: opadom nieprzekraczającym 100 mm odpowiada średnia $\text{PW} = 27,8 \text{ mm}$, opadom w granicach 100-200 mm – średnia wartość



Rys. 4. Rozkłady częstości (%) średniej dobowej zawartości wody opadowej w atmosferze (ciemnoszare słupki) oraz zawartości wody opadowej w dniach występowania maksymalnych dobowych opadów w Polsce (jasnoszare słupki)

Fig. 4. Distributions of frequency (%) of daily averages of precipitable water amounts (dark grey) and precipitable water amounts in days with extremely precipitation sums in Poland (light grey)

$PW=28,7$ mm, a najwyższym sumom dobowym opadu (>200 mm) – średnia $PW=29,2$ mm (tab. 4). Średnie te nie różnią się istotnie, niemniej jednak systematycznie, choć nieznacznie wzrastają wraz z wysokością opadu.

Tabela 4. Średnie dobowe zawartości wilgoci w atmosferze nad Polską (PW) w dniach wystąpienia maksymalnych sum dobowych opadu ($P_{\max}$) w wybranych miejscowościach w okresie 1958-2008

Table 4. Daily means of amount of precipitation water in the atmosphere over Poland (PW) in days with occurrence of extremely precipitation sums ($P_{\max}$) in selected stations in the period 1958-2008

Sumy dobowe opadu $P_{\max}$ [mm]	Liczebność	Średnia wieloletnia PW_{sr} [mm] w dniu $P_{\max}$	Aktualna średnia PW [mm] w dniu $P_{\max}$	Odchylenie względne Δ	Współczynnik efektywności $P_{\max}/PW$
$P_{\max}>200$	9	23,17	29,23	0,267	7,757
$100<P_{\max}<200$	47	24,20	28,65	0,196	4,333
$P_{\max}<100$	44	23,48	27,77	0,192	3,242
Ogółem	100	23,79	28,32	0,201	4,159

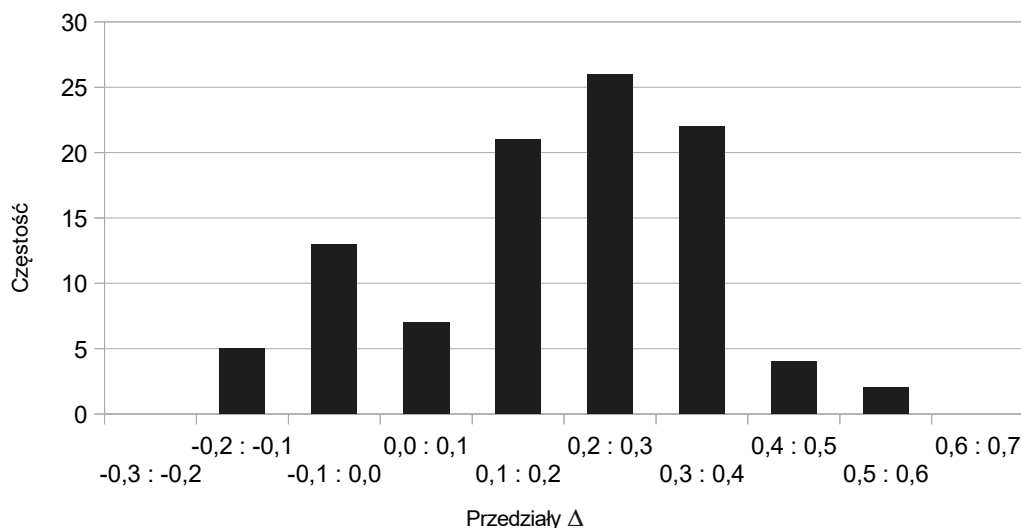
Wartości PW_{sr} są wyższe od średniej rocznej (15,9 mm) o prawie 50%, ale w znacznej części różnica ta wynika z terminów występowania opadów maksymalnych

w cieplejszej połowie roku, w której zawartość wody opadowej „z natury” jest wysoka. O realnym związku maksymalnych opadów z zawartością wody opadowej świadczą wyznaczone wartości względnych odchyień (Δ) wartości $PW_{\max}$ (charakteryzujących średnią zawartość wody opadowej w atmosferze w dniach wystąpienia opadów maksymalnych) od średniej wieloletniej (PW_{sr}) w tych samych dniach:

$$\Delta = [PW(P_{\max}) - PW_{\text{sr}}] / PW_{\text{sr}}$$

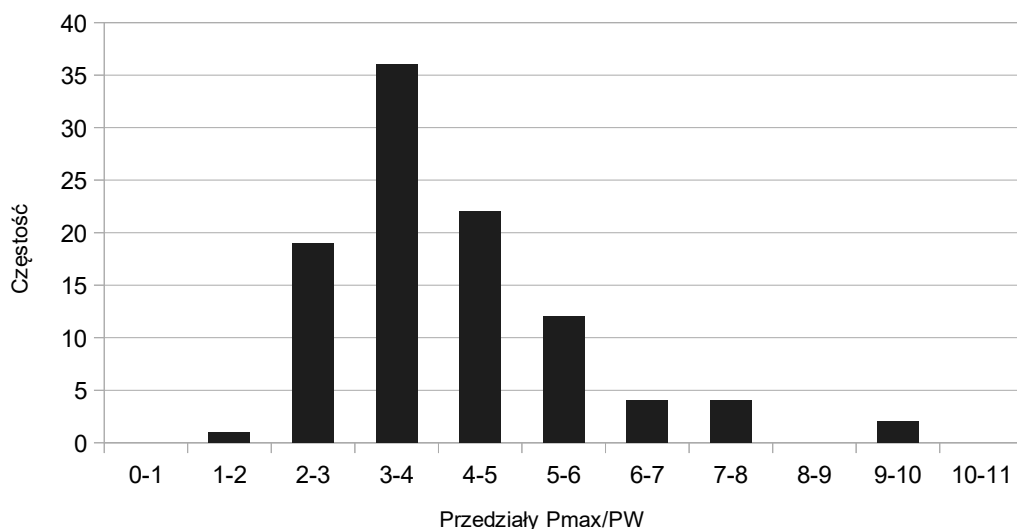
Odchylenia Δ wykazują, że maksymalne opady występują przy średnich „nadwyżkach” zapasu wody sięgających 1/5 wartości średnich wieloletnich PW_{sr} , odpowiadających terminom wystąpienia opadów $P_{\max}$. Nadwyżka ta wzrasta przy opadach najwyższych ($P_{\max} > 200$ mm) do ponad 1/4, jednak mała liczba przypadków tak wysokich opadów wyklucza uznanie tego przyrostu za istotny. Wysokość maksymalnych opadów dobowych kilkakrotnie przekracza aktualną zawartość wody w atmosferze. Średni iloraz $P_{\max}/PW$ wynosi 4,2, a przy opadach dobowych większych od 200 mm przekracza wartość 7 (tab. 4).

Zarówno odchylenia Δ , jak i współczynniki $P_{\max}/PW$, określające stosunek maksymalnych opadów do zawartości wody opadowej, wykazują zmienność, której odzwierciedleniem są ich rozkłady częstości (rys. 5 i 6). Przy maksymalnych opadach zawartość wody opadowej $PW_{\max}$ wykazuje najczęściej odchylenia od średniej wieloletniej w granicach 20-30%. Rzadko zdarzają się odchylenia przekraczające 50%, za to występują dość często przypadki, w których maksymalne opady tworzą się przy względnych „niedoborach” PW ($\Delta < 0$). Zanotowano 18 takich sytuacji.



Rys. 5. Rozkład częstości (%) względnych odchyień zawartości wody opadowej w atmosferze w dniach występowania maksymalnych dobowych opadów w Polsce

Fig. 5. Distribution of frequency (%) of relative deviations of precipitable water amounts in days with extremely precipitation sums in Poland



Rys. 6. Rozkład częstości (%) stosunku wysokości maksymalnych opadów dobowych w Polsce do zawartości wody opadowej w atmosferze ($P_{\max}/PW$)

Fig. 6. Distribution of frequency (%) of values of ratio of extremely precipitation daily totals in Poland to precipitable water amount ($P_{\max}/PW$)

Wszystkie analizowane opady maksymalne natomiast osiągały wysokość przekraczającą z reguły ponaddwukrotnie aktualną zawartość wody opadowej $PW_{\max}$. Najczęściej były to opady 3-4 razy wyższe od słupa wody opadowej (rys. 6).

Przedstawione porównania statystyczne pozwalają sądzić, że maksymalne opady w Polsce powstają w warunkach względnie wysokiej zawartości wody w atmosferze, ale wysokość tych maksimów słabo (lub wcale) zależy od aktualnej masy wody atmosferycznej. Wynika stąd, że o wysokości maksymalnych opadów może decydować przede wszystkim efektywność procesów opadotwórczych. Jest to wniosek zbieżny z rezultatami Bordi i in. (2016), którzy stwierdzili m.in. „tylko słabą korelację PWV (tu: PW) z obserwowanymi opadami” i znaleźli wysoką korelację opadów z indeksem efektywności PE (tu: $P_{\max}/PW$).

Wnioski

Opady o średniej wysokości dobowej wykorzystują ok. $\frac{1}{4}$ aktualnych zasobów wody w atmosferze nad Polską. Stopień tego wykorzystania wykazuje tendencję malejącą przy końcu lata i jesienią.

Wysokość opadów jest związana z zawartością wody opadowej głównie wskutek zbieżności rocznych cykli zmian opadów i PW – obydwa mają maksima letnie, a minima w zimie. Jedynie częstość opadów podlega odmiennemu rytmowi zmian rocznych,

osiągając najwyższe wartości na przełomie jesieni i zimy (z charakterystycznym przyrostem w drugiej połowie listopada – na początku „roku meteorologicznego”).

Maksymalne opady dobowe występujące w Polsce mogą wielokrotnie (najczęściej 3-4 krotnie) przekraczać średnią dobową zawartość wody w atmosferze. Podczas występowania maksymalnych opadów zawartość wody w atmosferze charakteryzuje się przeciętnie niezbyt wielką „nadwyżką”, stanowiącą ok. 1/5 średniej wieloletniej wartości PW, ale zdarzają się też maksymalne opady przy zawartości wody nieco niższej niż średnia PW.

Pozytywny związek wysokości opadów maksymalnych z zawartością wody opadowej jest słaby; w świetle analizowanych danych okazał się statystycznie nieistotny. Trzeba jednak podkreślić, na co wskazują te same dane, że do wystąpienia maksimum opadowego niezbędna jest określona zawartość wody w atmosferze. Wielkość tej „progowej” zawartości kształtuje się zapewne w pobliżu wartości $PW=22$ mm, gdyż przeważająca liczba opadów maksymalnych (95% analizowanych przypadków) występuje przy średniej zawartości wody opadowej nad Polską przekraczającej wartość 22 mm. Tak wysokie wartości PW zdarzają się w cieplej połowie roku. Największa częstość występowania maksymalnych opadów przypada na przedział $28 < PW < 30$ mm i kształtuje się w warunkach, gdy wartość PW jest o 20-30% wyższa od jej średniej wieloletniej wartości w terminie występowania opadu.

Wyniki przeprowadzonej analizy danych skłaniają do rozważenia, czy zawartość wody opadowej w atmosferze można uznać za dominujący czynnik kształtowania wysokości opadów atmosferycznych? Przyjęcie oczywistej tezy głoszącej, że „bez wody opadowej nie ma opadów” nie przynosi jeszcze odpowiedzi na takie pytanie...

Wprawdzie wykazano bardzo wyraźną zbieżność rocznych cykli sum opadów i obfitości opadów z cyklem PW , ale można od razu zapytać, czy ten roczny cykl opadowy wynika ze zmian PW w ciągu roku, czy może także (lub przede wszystkim?) z sezonowych zmian efektywności wykorzystania atmosferycznej wody opadowej w procesie powstawania opadów, tj. efektywności formowanej m.in. przez rozwijającą się w ciepłym okresie konwekcję. W klimatach oceanicznych opady w ciepłym sezonie nie wzrastają, mimo także większej w tym okresie zawartości wody opadowej. W Polsce częstość opadów wzrasta w sezonie jesienno-zimowym, jednocześnie z malejącą zawartością wody opadowej... Najwyższe sumy dobowe opadów są wielokrotnie większe od średniej obfitości opadów, ale towarzysząca tym maksimum zawartość wody opadowej w atmosferze zaledwie o 20-30% przewyższa poziom średniej PW .

O powstawaniu obfitych opadów i ich wysokości decyduje zespół czynników, którego syntetyczną charakterystyką jest zmienna nazywana efektywnością procesu opadowego (*precipitation efficiency*). Działanie tych czynników powoduje, że w ciągu godziny (a w skrajnych przypadkach nawet w ciągu kilku-, kilkunastu minut!) rzeczywisty opad może w Polsce przekroczyć wysokość słupa wody zawartej w atmosferze. Wykonane analizy średnich klimatologicznych sugerują, iż zawartość wody

opadowej w atmosferze nie spełnia roli głównego predyktora wysokości opadów atmosferycznych. Być może inne badania, przy wykorzystaniu bardziej zaawansowanych metod i precyzyjnych ocen zawartości wody opadowej w atmosferze, przyniosą odmienne wnioski... W niniejszym opracowaniu wskazano jedynie na istnienie pewnej progowej wartości PW, limitującej występowania największych opadów dobowych w Polsce. Próg ten stanowi pewien wyraz zależności opadów od zawartości wody opadowej w atmosferze.

Materiały wpłynęły do redakcji 28 XI 2015.

Literatura

- Bernas M., Kolendowicz L., 2013, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na występowanie ekstremalnych opadów atmosferycznych w Poznaniu w latach 1920-2010*. Badania Fizjograficzne, 4, seria A – Geografia Fizyczna, 7-27.
- Bogucka M., 1998, *Niektóre aspekty zmienności opadów maksymalnych dobowych w Warszawie i okolicy*. Acta Univ. Lodz., Folia Geogr. Phys., 3, 417-425.
- Bordi I., Zhu X., Fraedrich K., 2016, *Precipitation water vapor and its relationship with the Standardized Precipitation Index: ground-based GPS measurements and reanalysis data*. Theor. Appl. Climatol. 123, 1, 263-275.
- Cebulak E., 1992, *Maksymalne opady dobowe w dorzeczu górnej Wisły*. Zeszyty Nauk. UJ, Prace Geograficzne, 90, 80-96.
- Cebulak E., Pyrc R., 2006, *Metody opracowania zdarzeń ekstremalnych na przykładzie opadów atmosferycznych o natężeniu >100 mm/dobę w dorzeczu górnej Wisły w XX i XXI wieku*, [w:] Maciejewski M., Ostojski M. (red.) *Zagrożenia środowiska naturalnymi zjawiskami ekstremalnymi*. Monografie IMiGW, Warszawa, 9-26.
- Degirmendžić J., Kożuchowski K., 2017, *Mediterranean cyclones, the atmospheric moisture content and precipitation in Poland*. Geographia Polonica, 90, 1 (w druku).
- Fortuniak K., 2003, *Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne*. Wyd. UŁ, Łódź, ss. 233.
- Glossary of American Meteorological Society*, 2012, "Precipitation water". http://glossary.amersoc.org/wiki/Precipitable_water
- Grela J., Słota H., Zieliński J., 1997, *Monografia powodzi, lipiec 1997*. IMiGW, Warszawa.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D., 1996, *The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project*. Bull. of Am. Met. Soc., 77, 437-471.
- Kłysik K., Fortuniak K., 1993, *Maksymalne opady dobowe w środkowej Polsce*. Prz. Geogr., 64, 1-2, 97-110.
- Kożuchowski K., 2015, *Obfitość opadów w Polsce w przebiegu rocznym*. Prz. Geof., 60, 1-2, 27-38.
- Kożuchowski K., Wibig J., 1988, *Kontynentalizm pluwialny w Polsce; zróżnicowanie geograficzne i zmiany wieloletnie*. Acta Geographica Lodziensia, 55, ss. 102.
- Lenart W., 1983, *Transport pary wodnej nad terytorium Polski*. Prz. Geof., 28, 3-4, 281-290.
- Łupikasza E., 2010, *Genetyczne typy opadów ekstremalnych w sezonie letnim w Polsce oraz ich zmienność wieloletnia w okresie 1951-2007*. [w:] Bednorz E. (red.) *Klimat Polski na tle klimatu Europy. Warunki termiczne i opadowe*. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań, 131-145.
- Magnuszewski A., Soczyńska U. (red.), 2001, *Międzynarodowy słownik hydrologiczny*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, ss. 250.

- Majewski G., Przewoźniczuk W., Kleniewska M., 2010, *Warunki opadowe na stacji meteorologicznej Ursynów SGGW w latach 1960-2009*. Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska 2, (48), 3-22.
- Malinowska M., Miętus M., 2010, *Opady o dużym natężeniu w Gdyni i ich uwarunkowania atmosferyczne*, [w:] Ciupa T., Suligowski R. (red.) *Woda w badaniach geograficznych*. Instytut Geografii Uniwersytetu Jana Kochanowskiego, Kielce, 49-58.
- Niedźwiedz T., 2003, *Extreme precipitation in Central Europe and its synoptic background*. Papers on Global Change, 10, 15-30.
- Niedźwiedz T. (red.), 2003, *Słownik meteorologiczny*. PTGeof./IMI GW, Warszawa, ss. 496.
- O'Neill P., 1997, *Chemia środowiska*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, ss. 308.
- Pietkiewicz A. 1889, *Stosunki opadu atmosferycznego w Warszawie*. Pamiętnik Fizjograficzny, 9, 159-194.
- Prokop P., 2006, *Maksymalne opady oraz czas ich trwania na świecie i w Polsce*. Prz. Geof., 51, 2, 147-160.
- Rzepa M., 2004, *Najwyższe dobowe, pięciodniowe i dziesięciodniowe sumy opadów atmosferycznych w Łodzi w latach 1903-2003*. Acta Geogr. Lodz., 89, 87-100.
- Siwek K., 2010, *Występowanie na Lubelszczyźnie dobowych sum opadu atmosferycznego >100 mm i ich uwarunkowania cyrkulacyjne (1951-2000)*. Annales IMCS, Se. B., 65, 2, 117-125.
- Skowera B., Wojkowski J., 2003, *Changes in Hydrothermal Conditions in Poland in the Period 1931-1990*. Acta Univ. Wratislaviensis 2542, Studia Geograficzne 75, 262-267.
- Sobik M., Błaś M., 2010, *Wyjątkowe zdarzenia meteorologiczne*, [w:] Migoń P. (red.), *Wyjątkowe zdarzenia przyrodnicze na Dolnym Śląsku*. Uniw. Wrocławski, Wrocław, 35-59.
- Sobišek B. (red.), 1993, *Meteorologický slovník vykladovy a terminologický*. Akademia, Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha, ss. 594.
- Stach A., 2009, *Analiza struktury przestrzennej i czasoprzestrzennej maksymalnych opadów dobowych w Polsce w latach 1956-1980*. Wyd. Nauk. UAM, ser. Geografia , 85, Poznań. ss. 323.
- Suligowski R., 2013, *Opady maksymalne na potrzeby hydrologii*. SGGW, pre_suligowski.pdf.
- Świątek M., 2013, *Advection of air masses responsible for extreme rainfall totals in Poland, and exemplified by catastrophic floods in Raciborz (July 1997) and Dobczyce (May 2010)*. Acta Agrophysica, 20 (3), 481-494.
- Twardosz R., 2000, *Wieloletnia zmienność sum dobowych opadów w Krakowie w powiązaniu z sytuacjami synoptycznymi*. Prace Geograficzne, 105, IG UJ, 22-105.
- Twardosz R., 2007, *Opady atmosferyczne*, [w:] Matuszko D. (red.) *Klimat Krakowa w XX i XXI wieku*. Wyd. IGiPZ UJ, Kraków, 127-138.
- Ustrnul Z., Czekierda D., 2009, *Atlas ekstremalnych zjawisk meteorologicznych oraz sytuacji synoptycznych w Polsce*. Wyd. IMiGW, Warszawa, ss. 182.
- Wibig J., Siedlecki M., 2007, *Przestrzenny i czasowy rozkład zawartości wody opadowej w atmosferze nad Europą (1958-2005)*, [w:] Piotrowicz K., Twardosz R. (red.) *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych*. Wyd. UJ., Kraków, 195-204.
- Woś A., 1994, *Klimat Niziny Wielkopolskiej*. Wyd. Nauk. UAM, Poznań. ss. 192.
- Woś A., 1996, *Struktura sezonowa klimatu Polski*. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań, ss. 144.
- Ziemiański M., 2002, *Systemy baryczne umiarkowanych szerokości geograficznych jako wynik działania niestabilności paroklinowej*, [w:] Marsz A.A., Styszyńska A., (red.) *Oscylacja północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych hydrologicznych Polski*. Wyd. Uczelniane Akademii Morskiej, Gdynia, 205-214.

Streszczenie

Artykuł przedstawia relacje między rocznym przebiegiem zawartości wody opadowej w atmosferze nad Polską a przebiegiem wysokości sum opadów, obfitości opadów oraz częstości dni z opadami. Wykorzystano średnie wartości 5-dobowe analizowanych charakterystyk z okresu 1958-2008.

Wykazano zbieżność rocznego cyklu zmian zawartości wody w atmosferze z sumami i obfitością opadów. Składowe harmoniczne wyjaśniają znaczną część ich zmienności, przy czym cykl zawartości wody opadowej jest o ok. 10 dni opóźniony w stosunku do fazy cyklu zmian opadów. Stosunek średnich dobowych wartości sum opadowych do zawartości wody w atmosferze (efektywność wykorzystania wilgoci atmosferycznej w procesie powstawania opadu) zmienia się w ciągu roku od 0,19 w końcu września do 0,30 na początku kwietnia. Częstość opadów wykazuje słaby negatywny związek z zawartością wody opadowej. Liczba dni z opadem osiąga maksimum w drugiej połowie listopada.

Na podstawie 100 wybranych najwyższych sum opadów dobowych analizowano ich związki z zawartością wody opadowej w atmosferze. Opady maksymalne występują przy zawartości wilgoci $PW > 14$ mm, większość jednak przy zawartości wilgoci > 22 mm. Współczynnik efektywności wykorzystania wilgoci przy maksymalnych opadach wynosi najczęściej 3-4. Opady maksymalne występują przy średniej zawartości wody opadowej wyższej o ok. 20% od średniej wieloletniej, charakterystycznej dla terminu wystąpienia opadu. Związek wysokości opadu maksymalnego z zawartością wody opadowej jest jednak słaby. O wysokości opadów maksymalnych decyduje przede wszystkim efektywność wykorzystania zawartości wody atmosferycznej.

Słowa kluczowe: zawartość wody opadowej w atmosferze, sezonowe zmiany opadów, opady maksymalne, współczynnik efektywności procesów opadowych

Summary

The paper presents relationships between annual cycle of precipitable water in the atmosphere over Poland and annual courses of precipitation totals, precipitation abundance and frequency of rainy days. Averaged 5-days values of those characteristics from the period 1958-2008 have been used.

The annual cycles of precipitable water, precipitation sums and abundance of precipitation water are convergent. The harmonic components explain the most part of their variances in the year. However, it has been assumed, that the phase of precipitable water represents cycle by ca 10 days late. The ratio of averaged daily precipitation to the precipitable water (coefficient of effectiveness in use of atmospheric water) is varied from 0.19 in the end of September to 0.30 in the first part of April. In annual course the frequency of days with precipitation represents a weak negative correlation with precipitable water values. The annual maximum of number of rainy days occurs in the second part of November.

On the basis on 100 extreme high daily precipitation events in Poland their relations to actual precipitable water has been analyzed. Extreme precipitations occurred in days with relative high values of precipitable water (> 14 mm), the most common precipitation events correspond to the values > 22 mm. The coefficients of effectiveness for extreme precipitations equal the values 3-4 in the most part of cases. On average, the values of precipitable water deviations exceed by 20% the long-term mean in days with the extreme precipitations. However, it has been stated that the connection between the values of extreme precipitation and the values of precipitable water is rather weak. Maxima of precipitation are mostly controlled by effectiveness in use of atmospheric water.

Key words: precipitable water, annual cycles of precipitation, maxima of daily precipitation sums, coefficient of precipitation efficiency

Krzysztof M. Kożuchowski
kkożuchowski1@wp.pl
Uniwersytet Łódzki, Filia w Tomaszowie Mazowieckim