

KRYSTYNA BRYŚ

<https://orcid.org/0000-0001-6970-9649>
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska
pl. Grunwaldzki 24, 50-375 Wrocław
krystyna.brys@upwr.edu.pl

ANDRZEJ A. MARSZ

<https://orcid.org/0000-0002-1962-8004>
Stowarzyszenie Klimatologów Polskich
ul. Krakowskie Przedmieście 30, lok. 2014
00-927 Warszawa
aamarsz127@gmail.com

TADEUSZ BRYŚ

Polskie Towarzystwo Geofizyczne
Oddział Wrocławski
pl. Grunwaldzki 24
50-363 Wrocław
tbrys@tlen.pl

ANNA STYSZYŃSKA

<https://orcid.org/0000-0001-8763-9154>
Stowarzyszenie Klimatologów Polskich
ul. Krakowskie Przedmieście 30, lok. 2014
00-927 Warszawa
astys19@wp.pl

Zmierzone parowanie potencjalne we Wrocławiu a parowanie terenowe obliczone za pomocą wskaźnika Iwanowa (1961–2020)

The Measured Potential Evaporation in Wrocław and Surface Evaporation Calculated Using the Ivanov Formula (1961–2020)

Abstract: The study shows that the variability of field evaporation sums (Ev) calculated using the Ivanov formula from monthly series of air temperature and relative humidity from the IMWM-PIB Wrocław-Strachowice station relatively accurately reproduces the variability of the potential evaporation values measured in the Agro- and Hydrometeorology Wrocław-Swojec Observatory of the Wrocław University of Environmental and Life Sciences. The largest absolute errors in the estimated monthly Ev values are affected in the period from April to August (± 11.7 – 14.8 mm), and the lowest from November to February (± 4.8 – 10.6 mm). In the cool half-year (October–March), the Ev estimation gives “area-averaged” evaporation values close to reality with an error of about ± 24 – 25 mm, and in the warm half-year (April–September) with an error of ± 54 – 55 mm. In the case of estimated annual evaporation sums, Ivanov’s formula has an average error of about 75 mm, which is about 10–12% of this value. The most important factor contributing to the differences between the observed Ev in Wrocław-Swojec and the estimated Ev in Wrocław-Strachowice are the differences in monthly values of relative humidity between these stations (up to 10%). The obtained results allow for the conclusion that the sums of evaporation calculated by Ivanov’s method, especially the annual sums, can be reliably used for various types of hydrological calculations, including the estimation of the climatic water balance in Poland.

Keywords: potential evaporation; surface evaporation; Ivanov formula; estimation errors; Wrocław-Swojec

Abstrakt: W pracy wykazano, że zmienność sum parowania terenowego (E_v) obliczonych za pomocą formuły Iwanowa z miesięcznych szeregów temperatury powietrza i wilgotności względnej ze stacji IMGW-PIB Wrocław-Strachowice względnie dokładnie odtwarza zmienność wartości parowania potencjalnego mierzonych w Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Wrocław-Swojec Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Obliczone miesięczne sumy E_v są obarczone największymi błędami bezwzględnymi w okresie od kwietnia do sierpnia ($\pm 11,7$ – $14,8$ mm), a najmniejszymi – w okresie od listopada do lutego ($\pm 4,8$ – $10,6$ mm). W półroczu chłodnym (październik–marzec) estymacja E_v daje „obszarowo” zbliżone do rzeczywistości wartości parowania z błędem około ± 24 – 25 mm, a w półroczu ciepłym (kwiecień–wrzesień) z błędem ± 54 – 55 mm. W przypadku szacowanych rocznych sum parowania formuła Iwanowa obarczona jest przeciętnym błędem około 75 mm, co stanowi około 10–12% tej wielkości. Najważniejszym czynnikiem stanowiącym przyczynę różnic między zmierzonymi E_v we Wrocławiu-Swojcu i estymowanymi E_v we Wrocławiu-Strachowicach są różnice w miesięcznych wartościach wilgotności względnej między tymi stacjami (do 10%). Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że obliczane metodą Iwanowa sumy parowania, zwłaszcza sumy roczne, można z dużą wiarygodnością stosować do różnego rodzaju obliczeń hydrologicznych, w tym do szacowania klimatycznego bilansu wodnego na obszarze Polski.

Słowa kluczowe: parowanie potencjalne; parowanie terenowe; wskaźnik Iwanowa; błędy estymacji; Wrocław-Swojec

SFORMUŁOWANIE ZAGADNIENIA

Wskaźnik uwilgotnienia klimatu Iwanowa $W_k(m)$ jest prostym indeksem, pozwalającym na klasyfikację klimatów według stopnia ich uwilgotnienia/suchości. Ma on postać:

$$W_k(m) = (P(m) / E_v(m)) \cdot 100\% \quad (1),$$

gdzie: $P(m)$ – miesięczna suma opadów w miesiącu m (mm), $E_v(m)$ – miesięczna suma parowania (mm) w miesiącu m .

Iwanow (1958) w swojej pracy pisze, że wartość E_v to „ilość wody, która wyparowuje z danej powierzchni małych zbiorników wodnych i jezior”. Takie określenie mieści się więc w terminie „parowanie terenowe” (Brutsaert 1982) i dotyczy oszacowania przybliżonej wartości parowania rzeczywistego naturalnych powierzchni terenu.

Wzór Iwanowa na oszacowanie wartości parowania $E_v(m)$ w formule (1) ma postać:

$$E_v(m) = 0,0018 \cdot (25+T(m))^2 \cdot (100 - f(m)) \quad (2),$$

gdzie: $T(m)$ – średnia miesięczna temperatura powietrza ($^{\circ}\text{C}$), $f(m)$ – średnia miesięczna wilgotność względna (%). Roczną wartość E_v należy obliczać jako sumę wartości miesięcznych w danym roku.

Człon E_v wskaźnika uwilgotnienia klimatu Iwanowa jest w Polsce często wykorzystywany do szacowania rozmiaru parowania w danym miesiącu, sezonie

czy roku (np. Bac 1968; Kędziora 2008; Musiał, Bubnowska, Gąsiorek 2007; Okoniewska, Szumińska 2020; Radzka 2014; Siedlecki, Fortuniak, Pawlak 2012). Iwanow (1958) wyraża opinię, że szacowane tą metodą wartości E_v są jednymi z bardziej zbliżonych do rzeczywistości, w porównaniu z formułami innych autorów, służącymi do obliczania wartości ewapotranspiracji lub parowania z wolnej powierzchni wody. Według Kędziory (1999, 2008) E_v obliczone metodą Iwanowa daje wyjątkowo dobre oszacowanie parowania z wolnej powierzchni wody na terenie Polski, szczególnie w okresie chłodnym.

Wartość E_v jest funkcją, której argumentami są miesięczna temperatura powietrza i miesięczna wilgotność względna. Wartości tych elementów klimatycznych standardowo mierzy się na stacjach synoptycznych i klimatycznych, stąd ich zagęszczenie w przestrzeni jest duże, a także są one powszechnie dostępne. Pozwala to na uzyskanie obrazów oszacowanych rozkładów parowania terenowego o dość dobrej rozdzielczości przestrzennej. W porównaniu z innymi formułami pozwalającymi na oszacowanie parowania z wolnej powierzchni wody czy ewapotranspiracji (zob. np. Allen, Allen, Pereira, Raes, Smith 1998; Allen i in. 2006; Bac 1968; Bouchet 1963; Brutsaert 1982, 2015; Brutsaert, Stricker 1979; Kędziora 1999; Konstantinov, Astakhova, Levenko 1971; Penman 1948) zestaw zmiennych objaśniających, potrzebny do obliczenia sumy miesięcznej parowania terenowego (E_v) za pomocą wzoru Iwanowa, jest bardzo mały.

Należy pamiętać, że termin „parowanie” rozumiany jest jednoznacznie jedynie w ujęciu fizycznym – jako proces fizyczny przemiany fazowej wody z fazy ciekłej w fazę gazową. Dla badaczy środowiska przyrodniczego termin ten jest najczęściej tożsamy (zob. np. Brutsaert 1982; Budyko 1975; Konstantinov i in. 1971) z parowaniem terenowym, zwanym też parowaniem naturalnym (Penman 1948). Dotyczy on parowania obszarowego gleby i pokrywającej ją roślinności, czyli ewapotranspiracji, oraz parowania związanych z tym obszarem małych zbiorników wodnych. To ostatnie jest więc parowaniem z wolnej powierzchni wody, ale jako niezależne pojęcie obszarowe jest rezerwowane głównie dla parowania z większych rezerwuarów wód powierzchniowych, np. rzek, stawów, jezior, mórz. Termin „parowanie z wolnej powierzchni wody” dotyczy również parowania wskaźnikowego i częściowo parowania referencyjnego. Hydrododzy zajmujący się problematyką bilansu wodnego w skali zlewni używają najczęściej ogólnego terminu „parowanie” jako synonimu parowania terenowego, bez wnikania w szczegóły pojęciowe, które mają znaczenie dla agrometeorologa, melioranta lub rolnika-specjalisty interesującego się tematyką nawodnień.

Inne formuły, bardziej skomplikowane niż wzór Iwanowa, będące funkcją wielu zmiennych, np. Bowena, Penmana, Penmana-Monteitha (Kędziora 1999; Łabędzki, Szajda, Szuniewicz 1996; Rojek, Musiał, Gąsiorek 2014), pozwalają

na oszacowanie wielkości parowania potencjalnego (referencyjnego lub wskaźnikowego) lub ewapotranspiracji rzeczywistej (aktualnej)¹ tylko w okresie wegetacyjnym, a także/lub wymagają niestandardowych danych (np. prędkości wiatru na wysokości 2 m nad powierzchnią terenu) lub danych, które mierzone są tylko na wybranych stacjach (np. usłonecznienie rzeczywiste lub względne, strumień glebowy, saldo promieniowania, albedo). Większość z takich formuł dodatkowo wymaga „doliczania” różnych innych parametrów, będących argumentami ich funkcji (np. salda promieniowania, przejścia prędkości wiatru z 10 m na 2 m itd.). Stopień dokładności oszacowania tych dodatkowych, doliczanych parametrów jest na ogół nieznany.

Przy prowadzeniu różnego rodzaju szacunków najczęściej nieporozumień dotyczy terminów „parowanie referencyjne” i „parowanie wskaźnikowe”, które najczęściej postrzegane są jako synonimy. Są one ściśle związane z pośrednim, wykorzystującym wzór empiryczny, sposobem określania wartości parowania potencjalnego. Ich użycie podkreśla, że przyjęte wartości parowania nie pochodzą z pomiarów bezpośrednich (ewaporometrycznych), lecz mają jedynie charakter ich przybliżonego oszacowania. W literaturze anglosaskiej dotyczącej parowania z wolnej powierzchni wody oraz ewapotranspiracji potencjalnej powszechnie używa się terminów „parowanie referencyjne” i „ewapotranspiracja referencyjna” jako wartości obliczonych najczęściej z wzoru Penmana-Montheitha, zalecanego przez FAO (Allen i in. 1998, 2006) i WMO. Przymiotnik „referencyjny” czasami jednak jest używany, aby podkreślić, że przyjęte wartości parowania dotyczą konkretnej stacji odniesienia. Uwypuklają w ten sposób kluczowe znaczenie stacji meteorologicznej, z której wykorzystano dane pomiarowe do pośrednich (na podstawie wybranego wzoru empirycznego) obliczeń parowania

¹ W literaturze anglosaskiej przeciwstawia się ewapotranspirację potencjalną (ETP) ewapotranspiracji aktualnej (ETo lub ETa). Ta pierwsza związana jest z nieograniczonym przez czynniki glebowe, biologiczne czy agrotechniczne stałym dostępem roślin do wody w glebie. Regulatorem parowania są tu więc tylko zmienne warunki atmosferyczne. Pojęcie to podobnie jest rozumiane również w piśmiennictwie innych krajów, m.in. w literaturze polskiej (zob. np. Kędziora 1999). Ewaporacja aktualna wskazuje na hamujące lub wzmagające potencjalne parowanie terenowe oddziaływanie wyżej wskazanych czynników pozaatmosferycznych, których łączne oddziaływanie z czynnikami atmosferycznymi kształtuje ETa. Jest to pojęcie zbliżone do ewapotranspiracji rzeczywistej, stąd niekiedy w literaturze polskiej (zob. np. Kędziora 1999) występuje zamiast niej termin „ewapotranspiracja rzeczywista” (ETR). Prawdopodobnie jest to kalka językowa francuskiego terminu *evapotranspiration reelle*, który wprowadził do literatury Bouchet (1963). Wielu badaczy polskich stosuje oba pojęcia (ETR, ET lub ETa) jako synonimy. Część jednak, np. Bac, Rojek, zwraca uwagę, że pojęcie ETR jest precyzyjnie nieuchwytną realnością przyrodniczą dotyczącą parowania terenowego, do której z różną dokładnością, zależną od metod i błędów pomiarowych, zbliżają się oszacowania (metodą pośrednią lub bezpośrednią) ewapotranspiracji aktualnej.

terenowego zarówno w tej stacji, jak i na pobliskich obszarach, pozbawionych stacji meteorologicznych lub bezpośrednich pomiarów ewaporometrycznych. Tak oszacowane parowanie jest w rzeczywistości parowaniem potencjalnym w stacji odniesienia (*reference*), które uznaje się również jako reprezentatywne, choć tylko przybliżone, oszacowanie tego parowania na obszarze przyległym. Akcentuje się w ten sposób ważny dla badań przestrzennych i ich reprezentatywności aspekt miejsca doboru danych meteorologicznych zastosowanych w pośredniej metodzie oszacowania parowania. U badaczy polskich występuje termin „parowanie wskaźnikowe” (np. Bac 1968; Bryś 1997; Kasperska-Wołowicz, Łabędzki 2004; Łabędzki i in. 1996; Roguski, Sarnacka, Drupka 1988; Roguski, Łabędzki, Kasperska 2002). W ten sposób podkreślają oni znaczenie rodzaju ewaporometru (np. waga Wilda), na podstawie którego wyprowadzono formułę parowania z wolnej powierzchni wody. Zwraca się tu uwagę na wpływ rodzaju przyrządu pomiarowego i wielkości jego powierzchni parującej oraz usytuowania nad gruntem lub w gruncie na wyniki pomiarów parowania. Porównanie wyników wieloletnich pomiarów parowania we Wrocławiu-Swojcu z wagi Wilda na wysokości 0,5 m n.p.g. z synchronicznymi pomiarami innych typów ewaporometrów (np. Class-A, GGI-3000, basen WMO-20m²) wskazuje bowiem na otrzymywanie wyraźnie różnych wartości parowania potencjalnego (Bac 1968; Bryś 2001). Oba pojęcia parowania („referencyjne”, „wskaźnikowe”) związane są więc zawsze z pośrednimi metodami jego oszacowania, ale formuły empiryczne, które wykorzystują, mają swoje źródło w bezpośrednich (ewaporometrycznych) pomiarach parowania terenowego i badaniach ich relacji z podstawowymi elementami meteorologicznymi.

Formuła Iwanowa, jak pisze jej autor, jest formuła „globalną”, niezwiązaną z żadnym konkretnym miejscem na Ziemi i ma być słuszna dla obszarów lądowych w tropikach, w strefie umiarkowanej i nawet subpolarnej.

W Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu-Swojcu prowadzi się najdłuższe w Polsce i nieprzerwane do dzisiaj pomiary parowania wskaźnikowego za pomocą ewaporometru Wilda na poziomie 0,5 m n.p.g. Parowanie to można uznać jako pewne, akceptowalne przez wielu badaczy, przybliżenie do parowania potencjalnego, które daje ważną informację o tym parowaniu również w okresie zimowym (Bac 1968; Bryś 2001)². Seria pomiarowa jest, w sensie klimatologicznym, wystarczająco długa – obejmuje okres od stycznia 1961 r. do grudnia 2020 r., czyli pełne 60 lat, a jej

² Szerszą dyskusję tych relacji zawiera praca Baca (1968). Do dzisiaj wśród polskich badaczy nie ma zgody co do zakresu pojęciowego terminu „parowanie potencjalne” i jego uniwersalizmu.

homogeniczność nie budzi wątpliwości³. Istnieje zatem możliwość porównania wartości rzeczywistego (pomierzonego) parowania z wartościami E_v obliczonymi na podstawie dwóch elementów meteorologicznych – temperatury powietrza i jego wilgotności względnej, przy wykorzystaniu formuły Iwanowa (równanie [2]). Wobec „globalnego” charakteru formuły Iwanowa (1958) wykorzystanie danych pomiarowych z Obserwatorium UP we Wrocławiu-Swojcu do porównań można uważać za losowe. Pozwoli to na ocenę przydatności i zakresu stosowalności szacowania rozmiarów parowania metodą Iwanowa, a pośrednio na ocenę jakości szacunków klimatycznego bilansu wodnego (opad – parowanie), do obliczania którego mogą być wykorzystywane wartości E_v .

Celem tej pracy jest przedstawienie wyników analizy związków między miesięcznymi sumami parowania mierzonego we Wrocławiu-Swojcu i obliczonymi za pomocą formuły Iwanowa (równanie [2]) wartościami E_v na stacji IMGW-PIB Wrocław-Strachowice oraz ocena błędów szacowania parowania wynikających ze stosowania tej formuły.

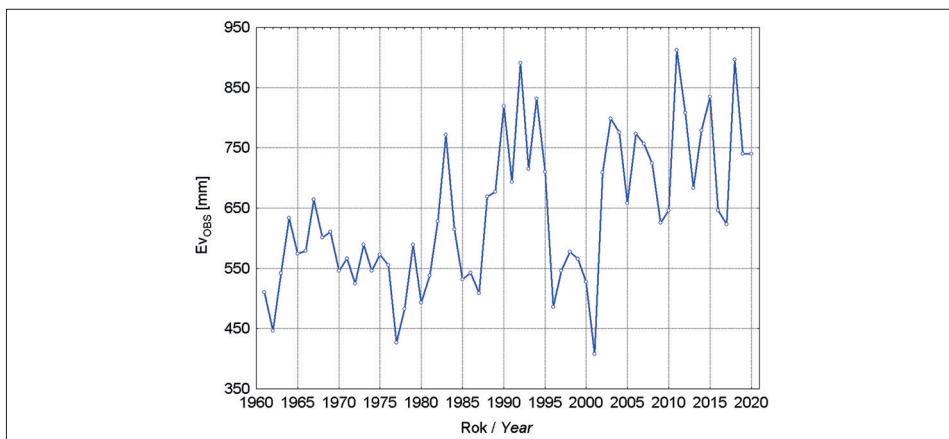
DANE I METODY BADAWCZE

Wartości miesięczne parowania potencjalnego (oznaczenie $E_{v_{OBS}}$) w Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu-Swojcu uzyskano z dobowych (odczyty ewaporometru w trzech standardowych terminach obserwacyjnych: sumowanie dobowe analogiczne jak dla opadu, czyli o 06 UTC) pomiarów parowania z wolnej powierzchni wody. Zrealizowano je w latach 1961–2020 za pomocą wagi Wilda (powyżej 200 cm²) umieszczonej na wysokości 0,5 m nad gruntem porośniętym stale strzyżoną (7–8 pokosów w roku) trawą. Teren Obserwatorium (51°07'N, 17°10'E, 121 m n.p.m.) znajduje się we wschodniej, peryferyjnej i rolniczej części Wrocławia, w zasięgu hydrologicznego oddziaływania wód powodziowych Odry i Widawy. Gleby tego obszaru wykształcone zostały na madach oraz piaskach i glinach polodowcowych. Teren ten uważa się za reprezentatywny dla cech glebowych i klimatycznych Pradoliny Wrocławskiej (Bryś 2013).

Zmienność sum parowania potencjalnego we Wrocławiu-Swojcu w okresie 1961–2020 jest bardzo duża. Wartości roczne zmieniają się od 383,7 (rok 2001) do 911,8 mm (rok 2011), przy średniej 60-letniej równej 640,5 mm i odchyleniu standardowym (σ) równym 122,0 mm (ryc. 1). W szeregu obserwacyjnym, oprócz

³ Fragmenty tej serii obserwacyjnej były wykorzystywane już wcześniej i posłużyły m.in. do konstrukcji formuł pozwalających na obliczenie wartości parowania wskaźnikowego (Bac 1968, 1970; Bryś 1998, 2002).

zmienności międzyrocznej, zaznacza się wyraźnie zmienność długookresowa. Duże zakresy zmienności w różnych przedziałach wartości parowania cechują również przebiegi w poszczególnych miesiącach (np. styczeń 3,7–44,2 mm, lipiec 42,2–197,8 mm). Takie cechy szeregu pozwalają ujawnić, w jakim stopniu oszacowane metodą Iwanowa wartości parowania są w stanie reprodukcować obserwowaną, znaczną zmienność międzymiesięczną i międzyroczną.



Ryc. 1. Przebieg rocznych sum parowania potencjalnego zmierzony w Obserwatorium we Wrocławiu-Swojcu (Ev_{OBS}) w latach 1961–2020 (opracowanie własne)

Fig. 1. The course of annual sums of potential evaporation in Wrocław-Swojec Observatory (Ev_{OBS}) in the years 1961–2020 (own elaboration)

Danymi niezbędnymi do obliczenia wartości Ev metodą Iwanowa były szeregi miesięczne temperatury powietrza (T) i wilgotności względnej (f). Mimo że we Wrocławiu-Swojcu te elementy były mierzone w tym samym czasie co parowanie, to do obliczeń przyjęto dane pochodzące ze stacji meteorologicznej IMGW-PIB Wrocław-Strachowice (www1) – WMO-Code: 124240, 51°06'N, 16°53'E, 124 m n.p.m. Stacja ta jest odległa o 16,9 km na W-WSW od miejsca pomiarów parowania, a jej teren leży również w obrębie Pradoliny Wrocławskiej. Takie działanie znajduje uzasadnienie w potrzebie zbadania, jak kształtują się wartości Ev obliczone ze standardowych danych stacyjnych rejestrowanych w pobliżu, ale nie bezpośrednio na miejscu pomiaru parowania. To ostatnie pozwoli określić, w jakiej mierze oszacowane wartości Ev metodą Iwanowa są „reprezentatywne” dla obszaru, a nie dla punktu.

Z szeregów miesięcznych wartości T i f ze stacji Wrocław-Strachowice obliczono, zgodnie z równaniem (2), miesięczne szeregi wartości Ev (oznaczenie Ev_{EST}). Te dane posłużyły następnie (sumowanie) do obliczenia sum rocznych Ev_{EST} i podobnych wartości dla krótszych okresów.

Na wstępie przeanalizowano na wykresach rozrzutu położenie punktów w przestrzeni wspólnej Ev_{EST} & Ev_{OBS} . Stwierdzono występowanie między obiema zmiennymi wyraźnych związków liniowych. Taki charakter związków uzasadnia badanie zależności prostymi metodami analizy liniowej – korelacji i regresji. Analizy te przeprowadzono na szeregach danych, z których – ze względu na przeprowadzoną w dalszej kolejności analizę błędów estymacji wartości Ev_{EST} – nie eliminowano wartości odstających.

Błędy, jakimi obarczone są szacowane za pomocą formuły Iwanowa wartości Ev , obliczono konwencjonalnymi metodami statystycznymi. Pierwszym krokiem było oszacowanie metodą najmniejszych kwadratów dwóch parametrów: wyrazu wolnego (a) i współczynnika regresji (b) równań liniowych $Ev_{OBS} = a + b \cdot Ev_{EST}$. Następnym krokiem była analiza reszt (różnica między Ev_{OBS} a Ev_{EST}), pozwalająca na oszacowanie standardowego błędu estymacji wartości Ev_{EST} w stosunku do zmierzonych sum parowania miesięcznego i rocznego (Ev_{OBS}). Przy ocenie istotności statystycznej przyjmowano wartość $p = 0,05$ jako granicę istotności statystycznej, a $p = 0,001$ jako granicę wysokiej istotności statystycznej. Do oceny istotności współczynników korelacji i współczynników regresji stosowano test t Studenta, a do oceny równań liniowych – test F Fishera-Snedecora.

WYNIKI

Analiza korelacji wykazała, że między obliczonymi według równania (2) wartościami miesięcznego parowania (Ev_{EST}) we Wrocławiu-Strachowicach i zmierzonymi w Obserwatorium Wrocław-Swojec wartościami parowania (Ev_{OBS}) występują bardzo silne i wysoce istotne związki. Wyniki analizy korelacji zestawiono w tab. 1.

Zmienność Ev_{EST} objaśnia w poszczególnych miesiącach od 38% do 81% wariancji zmierzonego parowania (Ev_{OBS}) i 64%, czyli około dwie trzecie, wariancji rocznej sumy zmierzonego parowania. Przegląd wartości współczynników korelacji i wartości współczynników determinacji w poszczególnych miesiącach wskazuje, że najlepsze objaśnienie wariancji Ev_{OBS} przez oszacowaną zmienność Ev_{EST} odnotowuje się w lipcu (81%), stosunkowo wysokie wartości wyżej wskazanych współczynników występują w okresie od maja do września oraz w najchłodniejszych miesiącach roku – styczniu i lutym. Zmienność Ev_{EST} najslabiej objaśnia wariancję zmierzonego parowania w listopadzie i grudniu, czyli w okresie późnej jesieni i przedzimia, kiedy to stopień objaśnienia spada poniżej 50%.

Zależność między obserwowanymi i estymowanymi wartościami parowania dość silnie różnicuje się, gdy bada się związki między sumami parowania

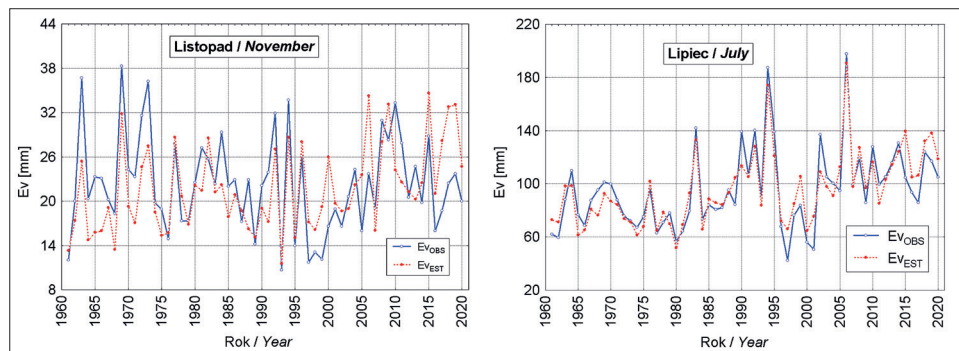
Tab. 1. Współczynniki korelacji (r) między szeregami miesięcznego parowania obliczonymi za pomocą wzoru Iwanowa na stacji Wrocław-Strachowice i szeregami sum miesięcznych parowania zmierzonego w Obserwatorium we Wrocławiu-Swojcu oraz ich współczynniki determinacji (r^2); okres korelacji: 1961–2020; wszystkie współczynniki korelacji są wysoce ($p \ll 0,001$) istotne statystycznie (opracowanie własne)

Tab. 1. Correlation coefficients (r) between the series of monthly evaporation calculated using the Ivanov formula in Wrocław-Strachowice station and the series of monthly evaporation sums measured in Wrocław-Swojec Observatory and their determination coefficients (r^2); correlation period: 1961–2020; all correlation coefficients are highly ($p \ll 0.001$) statistically significant (own elaboration)

Miara Value	Miesiąc / Month												Rok Year
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
r	0,87	0,84	0,79	0,78	0,81	0,87	0,90	0,83	0,85	0,79	0,62	0,70	0,80
r^2	0,76	0,71	0,62	0,61	0,66	0,76	0,81	0,69	0,72	0,62	0,38	0,49	0,64

w półroczu chłodnym (10–03) i półroczu ciepłym (04–09). Zmienność Ev_{EST} w półroczu chłodnym objaśnia tylko $\sim 45\%$ zmienności Ev_{OBS} ($r = 0,67$; $p \ll 0,001$), natomiast w półroczu ciepłym stopień objaśnienia jest znacznie wyższy, wynosi bowiem nieco ponad 70% ($r = 0,84$; $p \ll 0,0001$). Porównanie przebiegów sum miesięcznych parowania potencjalnego pochodzących z pomiarów (Ev_{OBS}) z oszacowanymi według formuły Iwanowa (Ev_{EST}) wskazuje, że błędy oszacowania wartości parowania rozkładają się nierównomiernie w ciągu roku (ryc. 2).

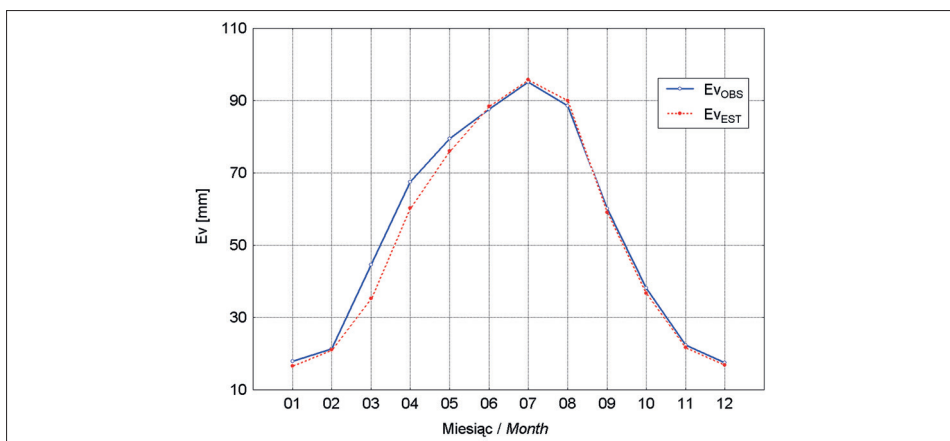
W okresie wiosny, rozumianej jako okres od marca do maja, estymowane wartości Ev_{EST} są obarczone błędem systematycznym. Wartości Ev_{EST} są



Ryc. 2. Przebieg sum miesięcznych parowania potencjalnego mierzonego w Obserwatorium we Wrocławiu-Swojcu (Ev_{OBS}) z oszacowanymi za pomocą formuły Iwanowa wartościami parowania potencjalnego na stacji Wrocław-Strachowice (Ev_{EST}) w listopadzie ($r = 0,62$, najsłabsze korelacje) i w lipcu ($r = 0,90$, najsilniejsze korelacje; zob. tab. 1). Porównując przebiegi, należy zwrócić uwagę na odmienną skalowania osi y na obu rycinach (opracowanie własne)

Fig. 2. The course of the monthly sum of potential evaporation measured in Wrocław-Swojec Observatory (Ev_{OBS}) with the values of potential evaporation estimated using the Ivanov formula in Wrocław-Strachowice station (Ev_{EST}) in November ($r = 0.62$, the weakest correlations) and in July ($r = 0.90$, the strongest correlations; see Tab. 1). When comparing the waveforms, attention should be paid to the different scaling of the y-axis in both figures (own elaboration)

niedoszacowane, przy czym największy jest średni błąd szacunku w marcu (średnio $-9,38$ mm), w kwietniu błąd ten zmniejsza się do $-7,31$ mm, a w maju do $-3,53$ mm (ryc. 3). W odsetku średniej miesięcznej zmierzonej wartości parowania błędy te wynoszą odpowiednio: -21% , -11% i $-4,5\%$. W pozostałych miesiącach roku występujące różnice nie mają znaczenia – są one mniejsze lub znacznie mniejsze od błędu standardowego oszacowania średnich, a więc statystycznie nieistotne.



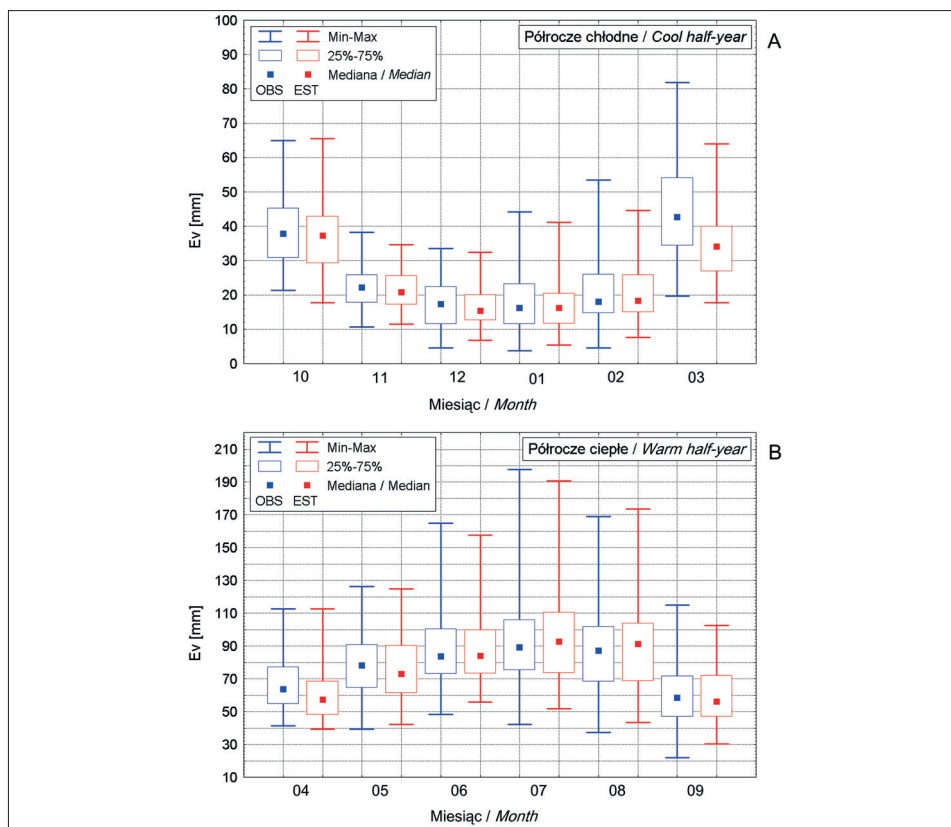
Ryc. 3. Przebieg średnich miesięcznych sum parowania: mierzonego w Obserwatorium we Wrocławiu-Swojcu (Ev_{OBS}) i oszacowanych za pomocą formuły Iwanowa na stacji Wrocław-Strachowice (Ev_{EST}); średnie z okresu 1961–2020 (opracowanie własne)

Fig. 3. Course of monthly average sums of evaporation values: measured at the Wrocław-Swojec Observatory (Ev_{OBS}) and estimated using the Ivanov formula at the Wrocław-Strachowice station (Ev_{EST}); averages for the period 1961–2020 (own elaboration)

To wiosenne „niedoszacowanie” przez formułę Iwanowa wartości parowania przenosi się na niedoszacowanie parowania rocznego. Różnica nie jest znaczna ($-22,75$ mm, $-3,55\%$ Ev_{OBS}) i praktycznie również nie ma żadnego znaczenia, gdyż średnia suma roczna Ev_{OBS} jest równa $640,5(\pm 15,7)^4$ mm, a średnia suma roczna Ev_{EST} $617,8(\pm 15,7)$ mm. Nie można zatem twierdzić, że średnie roczne są istotnie różne.

Porównanie rozkładów zmierzonych i oszacowanych miesięcznych sum parowania w 60-leciu 1961–2020 wykazuje, że poza marcem i kwietniem rozkłady są do siebie bardzo podobne, choć zaznacza się tendencja do zmniejszania rozpiętości ekstremów w zbiorze wartości estymowanych w stosunku do wartości mierzonych (ryc. 4). Wartości median w poszczególnych miesiącach mają bardzo bliskie sobie wartości. Różnice między medianami w półroczu chłodnym (ryc. 4A), w którym wartości parowania są niewielkie, mieszczą się w granicach

⁴ W nawiasach podano błąd standardowy oszacowania średnich.



Ryc. 4. Zakresy zmienności miesięcznych sum parowania w szeregach wartości zmierzonych (OBS) i estymowanych za pomocą formuły Iwanowa (EST) w półroczu chłodnym (październik–marzec) – A i w półroczu ciepłym (kwiecień–wrzesień) – B. Porównując zakresy zmienności, należy zwrócić uwagę na odmienną skalowanie osi y w półroczu chłodnym i ciepłym (opracowanie własne)
 Fig. 4. Ranges of variability of monthly evaporation sums in the measured series (OBS) and estimated using the Ivanov formula (EST) in the cool half-year (October–March) – A and warm half-year (April–September) – B. When comparing the ranges of variability, attention should be paid to the different scaling of the y-axis in the cold and warm half-year (own elaboration)

od ułamka milimetra do 4,3 mm, w półroczu ciepłym zaś (ryc. 4B), kiedy miesięczne sumy parowania rosną, różnice te stają się nieco większe (od $-0,5$ do $5,2$). Podobnie, za wyjątkiem marca i kwietnia, zachowują się dolne granice drugiego i górne granice trzeciego kwartyła.

Błąd oszacowania miesięcznych i rocznych wartości estymowanych w stosunku do wartości mierzonych obliczano metodą opisaną w części dotyczącej danych i metod badawczych. Analiza regresji wykazała, że w równaniach przejścia od grudnia do marca oraz od czerwca do września oszacowane wartości wyrazu wolnego są statystycznie nieistotne, co zmusza do estymacji Ev_{OBS} za pomocą równań bez wyrazu wolnego. W pozostałych miesiącach oraz w roku

równania zawierają wyraz wolny. Oszacowanie parametrów wszystkich równań jest wysoce istotne, przy czym testy wykazują, że prawdopodobieństwo przypadkowego uzyskania takich wartości współczynników regresji jest mniejsze od 1 na milion. Analiza reszt pozwoliła na określenie standardowego błędu estymacji (BSE, mm). Wyniki tych szacunków zestawiono w tab. 2.

Tab. 2. Parametry równań liniowych (a i b) szacujących formułą Iwanowa miesięczne i roczne sumy parowania (E_v) na stacji Wrocław-Strachowice i ich błędy standardowe estymacji (BSE, mm); okres analizy: lata 1961–2020 (opracowanie własne)

Tab. 2. Parameters of linear equations (a and b) estimating monthly and annual evaporation sums (E_v) at the Wrocław-Strachowice station and their standard errors of estimation (SEE, mm) using the Ivanov formula; period of analysis: 1961–2020 (own elaboration)

Miesiąc Month	a	b	p	BSE / SEE
01	0	1,100(±0,034)	0,000 000	4,77
02	0	1,004(±0,031)	0,000 000	5,45
03	0	1,249(±0,030)	0,000 000	8,60
04	21,170(±5,035)	0,770(±0,080)	0,000 000	10,55
05	15,603(±6,259)	0,841(±0,080)	0,000 000	11,73
06	0	0,987(±0,016)	0,000 000	11,64
07	0	0,993(±0,017)	0,000 000	12,99
08	0	0,974(±0,021)	0,000 000	14,81
09	0	1,013(±0,021)	0,000 000	9,80
10	7,634(±3,250)	0,832(±0,086)	0,000 000	6,32
11	7,340(±2,561)	0,692(±0,114)	0,000 000	5,11
12	0	1,023(±0,036)	0,000 000	4,99
Rok / Year	148,82(±50,17)	0,796(±0,080)	0,000 000	74,61

Objaśnienie: a – wyraz wolny; b – współczynnik regresji równań liniowych $E_{v_{OBS}} = a + b \cdot E_{v_{EST}}$ (w nawiasach błąd standardowy oszacowania parametrów a i b); p – istotność oszacowania współczynnika regresji; wartość $p = 0,000\ 000$ oznacza, że $p < 0,000\ 001$.

Explanation: a – intercept term; b – regression coefficient of linear equations $E_{v_{OBS}} = a + b \cdot E_{v_{EST}}$ (in parentheses standard error of parameter estimation a and b); p – the significance of estimate of the regression coefficient; p value = 0.000 000 means that $p < 0.000\ 001$.

Generalizując dane zebrane w tab. 2, można stwierdzić, że w okresie od listopada do lutego błąd oszacowania parowania (BSE) za pomocą formuły Iwanowa wynosi około 5 mm. W marcu i październiku błąd ten zamyka się w granicach między 5 a 10 mm. W pozostałych miesiącach (kwiecień–wrzesień, czyli w półroczu ciepłym) błąd oszacowania miesięcznych wartości parowania mieści się w granicach między 10 a 15 mm.

Wartości sum miesięcznych parowania zmieniają się w ciągu roku, wykazując występowanie cyklu rocznego (zob. ryc. 3). Wpływa to na rangę błędów oszacowania parowania przy porównywaniu ich wartości dla poszczególnych

miesiący roku. Same, bezwzględnie ujęte, błędy oceny wyrażone w milimetrach (tab. 3) nie dają pełniejszego wyobrażenia o randze błędów szacunku sum parowania miesięcznego. Z tej przyczyny obliczono i przedstawiono także błędy względne. Wartości te zestawiono w tab. 3, tuż obok kolumn z błędami bezwzględnymi. Dla pełniejszego obrazu w tabeli zestawiono również wieloletnie średnie miesięczne i roczne zmierzone (Ev_{OBS}) w Obserwatorium we Wrocławiu-Swojcu i estymowane (Ev_{EST}) dla stacji Wrocław-Strachowice sumy parowania oraz różnice między nimi ($Ev_{OBS} - Ev_{EST}$) wyrażone w milimetrach i procentach. Te ostatnie wartości, za wyjątkiem średnich błędów oceny dla marca i kwietnia, są niewielkie, nie przekraczają bowiem 5 mm i kilku procent.

Tab. 3. Błędy, jakimi są obarczone sumy miesięcznego i rocznego parowania we Wrocławiu-Strachowicach (Ev_{EST}), estymowane formułą Iwanowa z wartości temperatury i wilgotności względnej na tej stacji, względem zmierzonego parowania miesięcznego i rocznego w Obserwatorium Wrocław-Swojec (Ev_{OBS}); okres analizy: lata 1961–2020 (opracowanie własne)

Tab. 3. The errors in the values of monthly and annual sums of evaporation in Wrocław-Strachowice (Ev_{EST}), estimated by the Ivanov formula from the values of temperature and relative humidity at this station, in relation to the measured monthly and annual evaporation at the Wrocław-Swojec Observatory (Ev_{OBS}); period of analysis: 1961–2020 (own elaboration)

Miesiąc Month	Ev_{OBS} (O) [mm]	Ev_{EST} (E) [mm]	O–E [mm]	O–E [%]	BSE / SSE [mm]	BSE / SEE [%]
01	17,9	16,6	1,29	7,20	4,77	26,6
02	21,3	21,0	0,26	1,24	5,45	25,6
03	44,6	35,3	9,38	21,01	8,60	19,3
04	67,6	60,3	7,31	10,82	10,55	15,6
05	79,5	76,0	3,53	4,44	11,73	14,7
06	87,7	88,4	-0,77	-0,88	11,64	13,3
07	95,1	95,8	-0,73	-0,77	12,99	13,7
08	88,6	90,0	-1,42	-1,60	14,81	16,7
09	60,2	59,1	1,08	1,80	9,80	16,3
10	38,2	36,7	1,44	3,78	6,32	16,5
11	22,3	21,7	0,66	2,94	5,11	22,9
12	17,5	16,8	0,70	4,01	4,99	28,5
Rok / Year	640,5	617,8	22,75	3,55	74,61	11,6

Objaśnienie: (O–E) – różnica między parowaniem zmierzonym w Obserwatorium Wrocław-Swojec (Ev_{OBS}) i parowaniem oszacowanym dla stacji Wrocław-Strachowice (Ev_{EST}) wyrażona w milimetrach ekwiwalentu słupa wody oraz w procentach względem obserwowanych miesięcznych i rocznej wartości parowania (%); BSE – standardowy błąd estymacji, jakim obarczona jest miesięczna i roczna wartość Ev_{EST} względem takich samych wartości Ev_{OBS} , wyrażony w milimetrach i procentach.

Explanation: (O–E) – the difference between the evaporation measured at the Wrocław-Swojec Observatory (Ev_{OBS}) and evaporation estimated at the Wrocław-Strachowice station (Ev_{EST}) expressed in the millimeters of the water column equivalent and as well as percentage relative to the monitored monthly and annual evaporation (%); SEE – a standard error of estimation that is loaded with the monthly and annual Ev_{EST} for the same Ev_{OBS} values, expressed in millimeters and percent.

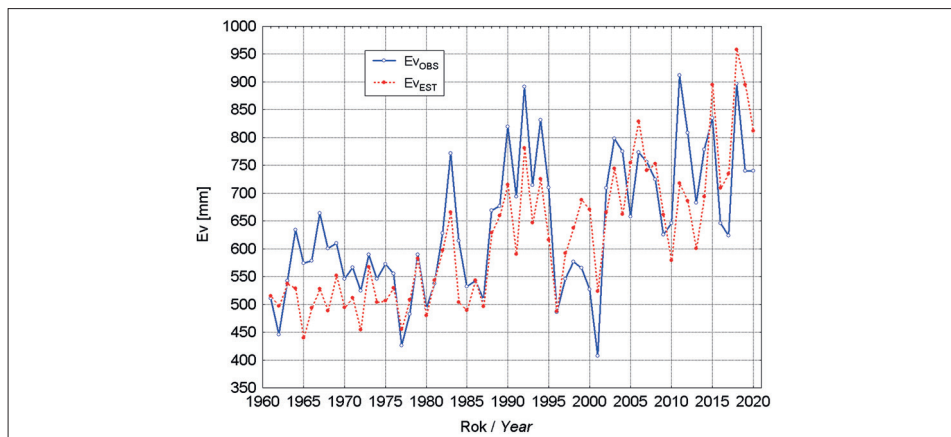
Analizując dane zawarte w tab. 3 (wartości BSE w milimetrach i procentach), nietrudno zauważyć, że im mniejsze parowanie w danym miesiącu, tym większym błędem względnym może być obciążona wartość szacunku parowania metodą Iwanowa. W przypadku gdy parowanie rośnie, zmniejsza się również względny błąd szacunku. Przy bardzo małych wartościach parowania błąd szacunku może, w poszczególnych przypadkach, przekroczyć nawet 100%, przy maksymalnych zaś utrzymuje się w granicach od kilkunastu do kilku procent.

W odniesieniu do standardowych błędów estymacji (BSE, %) parowania miesięcznego największymi błędami względnymi, przekraczającymi 20% (22,9–28,5%), obciążone są szacunki parowania w styczniu, lutym, listopadzie i grudniu. Ten, pozornie znaczny, błąd szacunku występuje w miesiącach, w których średnie sumy parowania są niewielkie – od 18 do 23 mm, co daje błąd bezwzględny w granicach około ± 5 mm. W pozostałych miesiącach roku względne błędy oszacowania wartości $E_{V_{EST}}$ mieszczą się w przedziale kilkunastu procent średniej wartości zmierzonego parowania potencjalnego, co daje błąd bezwzględny rzędu od kilku do nieco powyżej 10 mm. Zwraca uwagę, że najmniejszym względnym błędem szacunku (11,6%) obciążona jest roczna suma parowania potencjalnego. Stanowi to wynik wzajemnego znoszenia się błędów o przeciwnych znakach, które występują w kolejnych miesiącach roku.

DYSKUSJA WYNIKÓW I WNIOSKI

Analiza reszt wykazuje, że wartości parowania potencjalnego obliczone metodą Iwanowa wykazują bardzo dobrą, niemal 100-procentową zgodność w fazie (wzrost, spadek) z przebiegiem mierzonych wartości parowania potencjalnego. Zmienność wartości $E_{V_{EST}}$ dobrze reprodukuje zmienność długookresową mierzonego parowania, gorzej zaś zmienność krótkookresową (ryc. 5).

Większe niezgodności występują w przypadku amplitudy obu przebiegów i to one stanowią przyczynę osłabienia siły związku między wartościami estymowanymi i wartościami mierzonymi parowania. Przyczyną tych ostatnich różnic są z jednej strony właściwości równań liniowych, w których estymowane wartości współczynników regresji stanowią wartości „średnie” dla całego zbioru, z drugiej zaś różnice w wielkości elementów meteorologicznych między stacjami Wrocław-Swojec i Wrocław-Strachowice. O ile różnice miesięcznej temperatury powietrza między tymi stacjami są zanedbywalnie małe ($\pm 0,1$ – $0,4^\circ\text{C}$), o tyle wyraźnie większe są różnice w przebiegu wilgotności względnej, które w niektórych miesiącach dochodzą od kilku do nawet 10% (ryc. 6). Wobec tego, że w formule Iwanowa człon $(100 - f)$ mnoży człon temperatury $(25 + T)^2$, to nawet kilkuprocentowe różnice wilgotności względnej między miejscem pomiaru

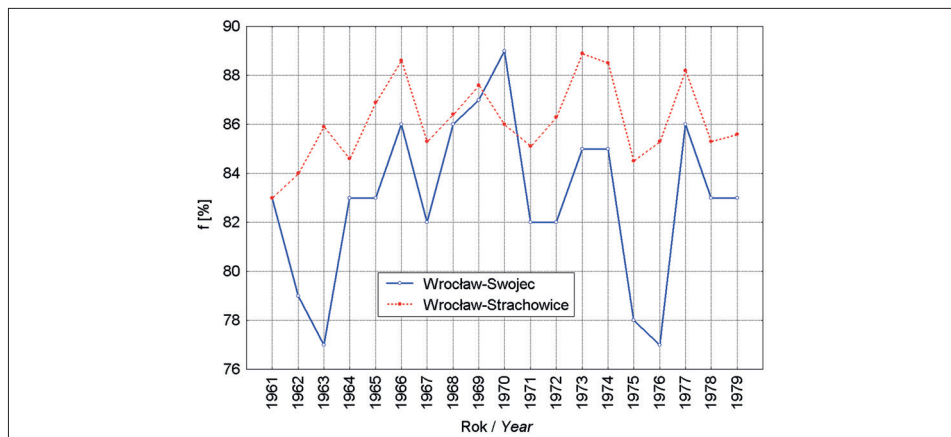


Ryc. 5. Przebieg rocznych sum parowania potencjalnego mierzonych w Obserwatorium Wrocław-Swojec (Ev_{OBS}) i oszacowanych za pomocą formuły Iwanowa z danych ze stacji Wrocław-Strachowice (Ev_{EST}); okres 1961–2020 (opracowanie własne)

Fig. 5. Course of the annual values of potential evaporation measured at the Wrocław-Swojec Observatory (Ev_{OBS}) and estimated using the Ivanov formula from data at the Wrocław-Strachowice station (Ev_{EST}); period 1961–2020 (own elaboration)

parowania i stacją meteorologiczną znajdującą się w pobliżu, przy minimalnych różnicach temperatury, dają w rezultacie również znaczne różnice w ocenie (estymacji) rozmiaru parowania.

Tym niemniej przeprowadzona analiza wskazuje, że mimo nieuniknionych różnic między przebiegiem elementów meteorologicznych między oboma



Ryc. 6. Przebieg miesięcznej wilgotności względnej w styczniach lat 1961–1979 w Obserwatorium Wrocław-Swojec (punkt pomiaru parowania) i na stacji Wrocław-Strachowice (punkt, z którego pochodzą dane do obliczania wartości parowania metodą Iwanowa; opracowanie własne)

Fig. 6. Course of monthly relative humidity in January 1961–1979 at the Wrocław-Swojec Observatory (evaporation measurement point) and Wrocław-Strachowice station (the point from which the data for calculating the evaporation value by the Ivanov's method are derived; own elaboration)

punktami można stwierdzić, że oszacowane metodą Iwanowa parowanie daje wartości bardzo bliskie parowaniu zmierzonemu również „obszarowo”. W tym przypadku jest to daleko posunięta zgodność na obszarze w promieniu około 20 km od położenia punktu pomiaru parowania potencjalnego.

Pewnym problemem jest kwestia występowania błędu systematycznego w miesiącach wiosennych (03–05; zob. ryc. 3). Można przypuszczać, że dla „tarowania” swojej formuły w szerokościach umiarkowanych Iwanow (1958) wykorzystywał głównie dane ze stacji z obszaru ZSRR. Przebieg temperatury na tych stacjach wykazuje znaczne cechy kontynentalne, dla których charakterystyczny jest szybki wzrost temperatury w okresie przejścia od zimy do lata, wymuszany przez rosnący dopływ energii promienistej Słońca. We Wrocławiu parowanie jest znacznie mocniej powiązane z dopływem radiacji słonecznej niż z temperaturą powietrza (Bryś 1997, 1998, 2013), co potwierdza wcześniejsze spostrzeżenia de Vriessa (1975) oraz Jaworskiego i Paszyńskiego (1978). Zmienność usłonecznienia silnie i bezpośrednio wpływa na temperaturę gruntu (podłoża) oraz na temperaturę powierzchni zbiorników wodnych, co przekłada się na regulację niedosytu wilgotności w warstwie przyziemnej, a tym samym na rozmiar parowania. W kształtowaniu temperatury miesięcznej Wrocławia i jego okolic znaczną rolę odgrywa ciepło przynoszone przez adwekcje, głównie powietrza morskiego o różnym stopniu transformacji, w związku z czym przebieg temperatury w miesiącach wiosennych jest tu „opóźniony” w stosunku do dopływu radiacji (zob. Janušková 2016, tu ryc. 2). Z kolei podobne przesunięcie przebiegu temperatury w stosunku do dopływu radiacji jesienią i w przedziemu jest kompensowane przez wzrost wilgotności względnej w tym okresie, co zmniejsza lub likwiduje błąd systematyczny w wielkości parowania.

Podsumowując, można stwierdzić, że wielkości parowania potencjalnego szacowane z formuły Iwanowa dają „obszarowo” zbliżone do rzeczywistości wartości, z przeciętnym błędem około ± 24 – 25 mm dla sumy parowania miesięcznego w okresie chłodnego półrocza (październik–marzec) i ± 54 – 55 mm dla sumy parowania miesięcznego w okresie półrocza ciepłego (kwiecień–wrzesień). Stanowi to odpowiednio $\sim 15\%$ i $\sim 11\%$ półrocznych sum parowania. W przypadku rocznych sum parowania formuła ta jest obciążona przeciętnym błędem około 75 mm, co stanowi około 11–12% tej wielkości.

W przypadku miesięcznych sum parowania rozrzut błędów jest znacznie większy – ogólnie stosunkowo małym błędem względnym (zob. tab. 2 i 3) obciążone są oszacowane za pomocą tej metody wartości parowania w miesiącach cieplej pory roku, znacznie większym zaś miesiące chłodnej pory roku. W tym ostatnim przypadku nie należy budować hipotez opierających się na niewielkich (± 5 – 10 mm) różnicach oszacowanych sum parowania w danym miesiącu.

W stosunku do formuły Iwanowa, niemającej na łądach ograniczeń przestrzennych, położenie obu stacji – miejsca pomiaru parowania (Obserwatorium UP Wrocław-Swojec) i miejsca obliczania parowania (stacja IMGW-PIB Wrocław-Strachowice) – może być traktowane, jak już wspomniano wcześniej, jako losowe. Pozwala to sądzić, że podobne zależności i rozkłady błędów jak we Wrocławiu będą występować na całym obszarze Polski. Tym samym oszacowane tą metodą wartości parowania, zwłaszcza parowania rocznego, można z dużą wiarygodnością stosować do różnego rodzaju obliczeń hydrologicznych, w tym do szacowania klimatycznego bilansu wodnego.

BIBLIOGRAFIA

Literatura

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. *Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements)*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Allen R.G., Pruitt W.O., Wright J.L., Howell T.A., Venturi F., ... Elliott R. 2006. A Recommendation on Standardized Surface Resistance for Hourly Calculation of Reference ETo by FAO56 Penman-Monteith Method. *Agricultural Water Management* 81(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>
- Bac S. 1968. Studia nad parowaniem z wolnej powierzchni wodnej, parowaniem terenowym i ewapotranspiracją potencjalną. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Rolniczej we Wrocławiu. Melioracja* 80(13), 7–68.
- Bac S. 1970. Metodyka pomiarów parowania terenowego za pomocą ewaporometrów. *Prace i Studia Komitetu Gospodarki Wodnej* 10, 287–366.
- Bouchet R.J. 1963. Evapotranspiration reelle, evapotranspiration potentielle, et production agricole. *Annales Agronomae* 14, 743–824.
- Brutsaert W.H. 1982. *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications*. Dordrecht: Reidel Publishing Co.
- Brutsaert W.H. 2015. A Generalized Complementary Principle with Physical Constraints for Land-Surface Evaporation. *Water Resource Research* 51(10), 8087–8093. <https://doi.org/10.1002/2015WR017720>
- Brutsaert W.H., Stricker H. 1979. An Advection-Aridity Approach to Estimate Actual Regional Evapotranspiration. *Water Resource Research* 15(2), 443–450. <https://doi.org/10.1029/WR015i002p00443>
- Bryś K. 1997. Oddziaływanie czynnika radiacyjnego na parowanie terenowe w stacji Wrocław-Swojec. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Melioracje i Inżynieria Środowiska* 17, 169–182.
- Bryś K. 1998. Rola czynnika radiacyjnego w ewapotranspiracji. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu. Inżynieria Środowiska* (349), 17–51.
- Bryś K. 2001. Porównanie standardowej metody pomiaru parowania (ewaporometr Wilda) ze standardem anglosaskim (Class A) w świetle badań polowych we Wrocławiu. *Annales UMCS. Sectio B* 55–56, 81–93.
- Bryś K. 2002. Nowy wrocławski wzór na parowanie potencjalne. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Melioracje* 23, 9–21.

- Bryś K. 2013. *Dynamika bilansu radiacyjnego murawy oraz powierzchni nieporośniętej*. Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego.
- Budyko M. 1975. *Klimat i życie*. Warszawa: PWN.
- Iwanow N.N. 1958. Atmosfernoje uwlaźnenije tropičeskikh i sopedelnykh stran zemnogo šara. *Izvestiya Vsesoyuznogo Geografičeskogo Obščestva* 90(5), 410–425.
- Januškova M. 2016. Hodnotenie kontinentality klimy s využitym ročného chodu sum extra-terstrckého žarenia. *Fyzickogeografický Sbornik (Physical Geography Proceedings)* 14, 78–83.
- Jaworski J., Paszyński J. 1978. Straty ciepła w procesie parowania terenowego i potencjalnego na tle innych czynników bilansu cieplnego powierzchni czynnej. *Przegląd Geofizyczny* 23(3), 171–179.
- Kasperska-Wołowicz W., Łabędzki L. 2004. Porównanie ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana i Penmana-Monteitha w różnych regionach Polski. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie* 4(2a), 123–136.
- Kędziora A. 1999. *Podstawy agrometeorologii*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
- Kędziora A. 2008. Bilans wodny krajobrazu konińskich kopalni odkrywkowych w zmieniających się warunkach klimatycznych. *Roczniki Gleboznawcze* 59(2), 104–118.
- Konstantinow A.R., Astakhova N.I., Levenko A.A. 1971. *Metody rasčeta ispareniia s sel'skokhoziaistvennykh polei*. Leningrad: Gidrometeoizdat.
- Łabędzki L., Szajda J., Szuniewicz J. 1996. Ewapotranspiracja upraw rolniczych – terminologia, definicje, metody obliczania: przegląd stanu wiedzy. *Materiały Informacyjne – Instytut Melioracji i Użytków Zielonych* 33, 1–15.
- Musiał E., Bubnowska J., Gąsiorek E. 2007. Zmiany klimatu we Wrocławiu-Swojcu w wieloletciu 1964–2000. W: K. Piotrowicz, R. Twardosz (red.), *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych* (s. 315–322). Kraków: IGiPZ UJ.
- Okoniewska M., Szumińska D. 2020. Changes in Potential Evaporation in the Years 1952–2018 in North-Western Poland in Terms of the Impact of Climatic Changes on Hydrological and Hydrochemical Conditions. *Water* 12, 877. <https://doi.org/10.3390/w12030877>
- Penman H.L. 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 193(1032), 120–145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Radzka E. 2014. Klimatyczny bilans wodny okresu wegetacyjnego (według wzoru Iwanowa) w środkowowschodniej Polsce. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie* 14(1), 67–76.
- Roguski W., Sarnacka S., Drupka S. 1988. *Instrukcja wyznaczania potrzeb i niedoborów wodnych roślin uprawnych i użytków zielonych*. Materiały Instruktażowe 66. Falenty: IMUZ.
- Roguski W., Łabędzki L., Kasperska W. 2002. Analiza wybranych wzorów do obliczania parowania wskaźnikowego na potrzeby nawadniania użytków zielonych. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie* 2(1), 197–209.
- Rojek M., Musiał E., Gąsiorek E. 2014. Porównanie wskaźników: standaryzowanego opadu (SPI), standaryzowanej ewapotranspiracji wskaźnikowej (SEI) oraz standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego (SKBW). *Inżynieria Ekologiczna* (39), 155–165. <https://doi.org/10.12912/2081139X.59>
- Siedlecki M., Fortuniak K., Pawlak W. 2012. Porównanie wybranych metod określania parowania w Łodzi. *Przegląd Geofizyczny* 57(2), 211–221.
- Vries D.A. de 1975. Heat Transfer in Soils. W: N.H. Afgan (Ed.), *Heat and Mass Transfer in the Biosphere* (s. 5–28). Washington: John Wiley and Sons.

Netografia

www1: <https://dane.publiczne.imgw.pl>