

NIEKTÓRE WYNIKI BADAŃ PRZEPROWADZONYCH W LATACH 1963-1969 NAD PAROWANIEM TERENOWYM METODĄ BILANSU RADIACYJNO-CIEPLNEGO

Kazimierz Matul

Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego, Politechnika Warszawska

WSTĘP

Parowanie jest procesem fizycznym, zależnym od właściwości powierzchni parującej i czynników klimatycznych. W Polsce niemal cała powierzchnia okryta jest roślinnością, w związku z czym transpiracja jako parowanie poprzez rośliny odgrywa zasadniczą rolę w parowaniu terenowym. A zatem rozpatrując proces tego parowania należy uwzględnić wpływ właściwości biologicznych roślin na przebieg transpiracji w układzie gleba-roślina-atmosfera. Jest to niezbędne dla ustalenia zależności parowania od wielkości masy organicznej (plonu), w tworzeniu której głównym czynnikiem jest energia promienista słońca.

W związku z tym, opierając się przy określaniu parowania na bilansie radiacyjno-cieplnym, nawiązano do prawa zachowania energii promienistej słońca jako źródła ciepła i światła we wszystkich procesach naturalnych, a w szczególności siły motorycznej uruchamiającej jeden z najważniejszych dla żywego świata proces fotosyntezy. Przyjęto następujące podstawowe założenia:

1. Przebieg fotosyntezy zależny jest od podziału energii promienistej słońca na parowanie, wymianę z glebą i atmosferą oraz na tworzenie masy organicznej.

2. Woda, następna w hierarchii po energii słonecznej, jest nie tylko niezastąpionym czynnikiem biologicznym w życiu roślin, ale poprzez właściwe melioracje hydrotermiczne może być regulatorem podziału energii słonecznej, warunkującym najkorzystniejszą zamianę tej ostatniej w energię biologiczną (formy ruchu materii nieożywionej w formę ruchu materii ożywionej).

3. Wynikająca z optymalnego podziału energii promienistej ilość energii zużywanej na parowanie odpowiada ilości ciepła parowania potencjalnego. W tych warunkach ilość tworzonej masy organicznej zależy tylko od właściwości biologicznych rośliny i jej zdolności asymilacyjnych, a w ujęciu energetycznym od udziału energii w tworzeniu masy, co jest uwarunkowane produktywnością fotosyntezy. Dobierając odpo-

wiedni rodzaj i odmianę roślin oraz właściwą strukturę i poziom nawożenia można ten udział znacznie zwiększyć, obniżając tym samym parowanie jednostkowe przy niezmiennym parowaniu potencjalnym.

W jednej z poprzednich prac autora [7] wykazano, że teoretycznie istnieją możliwości powiększenia, np. z 1% do 2,5%, stopnia wykorzystania energii na tworzenie masy i powiększenia ilości tej masy w tym samym stosunku, przy zachowaniu tej samej wielkości parowania. W tym przypadku 2,5 krotnie zmniejszyłoby się parowanie jednostkowe. Należy to mieć na uwadze, jako bardzo ważny element, przy ustalaniu zależności parowania od plonu.

W warunkach uwilgotnienia odbiegającego od optymalnego, mniejszy jest udział energii zużywanej na tworzenie masy oraz na parowanie rzeczywiste stanowiące część parowania potencjalnego, określoną za pomocą współczynnika biologiczno-energetycznego α_p .

Jak wykazują badania parowanie potencjalne określone metodą bilansu radiacyjno-cieplnego można uznać za kompleksowy wskaźnik klimatyczny, wykazujący stosunkowo niewielką zmienność w przestrzeni.

Współczynniki parowania rzeczywistego (lub terenowego), określone prawidłowo na podstawie omówionych założeń i odniesione do parowania potencjalnego, mają charakter uniwersalny w skali dużego obszaru dla określonego użytku i określonego poziomu agrotechniki oraz założonej wysokości plonu.

W innych pracach autora [7-9], dokonano przeglądu definicji oraz metod określania składowych bilansu radiacyjnego. Poddano analizie zależności pomiędzy bilansem energetycznym i wodnym oraz określono parametry we wzorach empirycznych. Następnie obliczono składowe bilansu radiacyjnego dla Polski i zaproponowano wzór empiryczny na parowanie potencjalne, cpierając się na bilansie radiacyjno-cieplnym oraz opracowano biologiczno-energetyczne współczynniki parowania dla niektórych roślin i gleb, umożliwiające określenie parowania terenowego.

W miarę zwiększania się ilości materiałów z badań, prowadzono prace nad modyfikacją ustalonych parametrów i zależności. Po porównaniu wyników obliczeń z wynikami pomiarów i obserwacji na niektórych stacjach badawczych, przyjęto ostateczne parametry i zależności empiryczne, stanowiące podstawę do obliczeń radiacji i parowania potencjalnego.

Obliczenia takie wykonano dla 39 stacji meteorologicznych, rozłożonych równomiernie na terenie kraju (z wyjątkiem rejonu gór i pogórza), w poszczególnych miesiącach i w całym okresie wegetacyjnym, w kolejnych latach 1948-1965.

Na tej podstawie, sporządzono mapy izolinii parowania potencjalnego i izohiet dla okresu 15-letniego (1948-1962) oraz wartości średnich z tego samego ciągu lat [13].

W niniejszej pracy przedstawiono — w dużym skrócie — metodę obliczeń, wprowadzone modyfikacje oraz wyniki porównań.

METODA OBLICZANIA PAROWANIA MOŻLIWEGO, POTENCJALNEGO I TERENOWEGO

Transformację promieniowania słonecznego na powierzchni ziemi obrazują dwa równania: równanie bilansu radiacyjnego (promieniowania) i równanie bilansu cieplnego. Pomiedzy tymi równaniami można postawić znak równości, ponieważ energia wyrażona bilansem (poprawnie: saldem) promieniowania zamienia się w energię cieplną, wyrażoną bilansem (saldem) cieplnym.

Równanie bilansu radiacyjnego ma postać:

$$R^* = Q_c (1 - a) - J,$$

gdzie:

- R — bilans radiacyjny,
- Q_c — radiacja całkowita (promieniowanie krótkofalowe),
- a — albedo, czyli odbita część radiacji całkowitej,
- J — promieniowanie efektywne (różnica długofalowego promieniowania powierzchni ziemi oraz zwrotnego promieniowania atmosfery).

Równanie bilansu cieplnego ma postać **:

$$R = EL + A + B,$$

gdzie:

- R — bilans cieplny równy bilansowi radiacyjnemu,
- EL — strata ciepła na parowanie (L — ciepło utajone parowania),
- A — wymiana ciepła z atmosferą przez unoszenie,
- B — wymiana ciepła z podłożem (glebą).

Jeżeli przyjąć, że wielkość B , jako nieznaczna w stosunku do R , może być pominięta, równanie przyjmie postać:

$$E = \frac{R}{L} - \frac{A}{L}$$

Zakładając, że:

$$E = a_e \frac{R}{L}$$

otrzymuje się:

$$\frac{A}{L} = (1 - a_e) \frac{R}{L},$$

* Dla porównywalności oznaczenia i terminologię przyjęto jak w wyżej omawianych pracach.

** Pominięto, jako nieznaczne, takie ilości ciepła jak np. na tworzenie masy organicznej (ok. 1%).

gdzie:

α_e — biologiczno-energetyczny współczynnik podziału bilansu radiacyjnego na parowanie E i wymianę z atmosferą A , zależny od uwilgotnienia gleby oraz stanu okrywy roślinnej i plonu,

$\frac{R}{L}$ — ekwiwalent wodny bilansu radiacji, określający grubość warstwy wody wyparowanej, przy zużyciu ciepła równego R .

$$\text{Dla } \alpha = 1,0 \quad E = E_m = \frac{R}{L},$$

gdzie: E_m — parowanie możliwe.

$$\text{Dla } \alpha = \alpha_{ep} \quad E = E_p = \alpha_{ep} \cdot E_m,$$

gdzie: E_p — parowanie potencjalne.

Parowanie możliwe E_m odpowiada grubości warstwy wody, na wyparowanie której zużyta zostaje energia równa bilansowi radiacji.

Parowanie potencjalne, zgodnie z definicją Penmana, „jest to parowanie z powierzchni roślin w pełnym rozwoju, szczelnie okrywających powierzchnię gleby, w warunkach nieograniczonych zapasów wodnych gleby”.

A zatem, mierząc na stacjach badawczych wartości E i R , można określić wartości współczynnika podziału energii: $\alpha_e = \frac{E}{E_m}$, w różnych fazach rozwojowych roślin i dla różnych plonów, z uwzględnieniem rodzaju gleby i uwilgotnienia.

Jak wynika z dalszej części referatu, w warunkach odpowiadających parowaniu potencjalnemu, dla rośliny wskaźnikowej, za jaką przyjęto roślinność łąkową, wielkość tego parowania ustalono z równania:

$$E_p = \alpha_{ep} \cdot E_m = 0,82 \cdot E_m.$$

W ostatnich swoich pracach [9, 10], autor zaproponował zmodyfikowany wzór na parowanie możliwe i potencjalne, wprowadzając obok czynnika głównego, którym jest bilans promieniowania, sumę temperatur powietrza w rozpatrywanym okresie.

*Ten ostatni czynnik przyczynia się w pewnym stopniu do uwzględnienia wymiany ciepła z glebą, która została we wzorze na bilans cieplny pominięta, jako wielkość nieznaczna w swej wartości bezwzględnej. Jak się okazało, ma ona jednak istotne znaczenie dla rozkładu w czasie wartości parowania możliwego i potencjalnego, wyznaczonego na podstawie bilansu radiacyjnego i temperatur. Fakt ten tłumaczy się obniżaniem temperatury przy strumieniu ciepła skierowanym w głąb gleby (miesiące IV-VII) i podwyższaniem temperatury przy kierunku odwrotnym, to znaczy ku powierzchni czynnej (miesiące VIII i IX).

Proponowane przez K. Matula wzory na parowanie możliwe (E_m) i potencjalne (E_p) mają następującą postać:

$$E_m = 0,50 \cdot \sqrt{R/L \cdot \Sigma t}$$

$$E_p = 0,82 \cdot E_m = 0,41 \cdot \sqrt{R/L \cdot \Sigma t}$$

Parowanie terenowe jest częścią parowania możliwego lub potencjalnego wg wzorów:

$$E = \alpha_e \cdot E_m \text{ lub } E = \alpha_p \cdot E_p$$

Sumy parowania możliwego i bilansu radiacyjnego z całego okresu wegetacyjnego są bardzo zbliżone, jednakże po wprowadzeniu temperatur, przebieg wartości miesięcznych jest różny, uwzględniający w większym stopniu miejscowe warunki fizjograficzne.

Parowanie potencjalne, uznane przez licznych badaczy krajowych i zagranicznych za pułap parowania terenowego, znalazło odbicie w wielu publikacjach i zastosowanie w projektowaniu z zakresu gospodarki wodnej i melioracji.

PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZONYCH I POMIERZONYCH

Ponieważ w Stacji Badawczej IGW — Swojec prowadzone były również pomiary aktynometryczne; skonfrontowano dane z bezpośrednich pomiarów z wartościami obliczonymi wzorami autora, na podstawie miejscowych notowań elementów hydrometeorologicznych, w zakresie składników bilansu radiacyjnego oraz parowania możliwego i potencjalnego.

Porównanie to dotyczyło: 1) radiacji całkowitej (z uwzględnieniem zachmurzenia), 2) radiacji pochłanianej, 3) promieniowania efektywnego, 4) bilansu radiacyjnego oraz parowania potencjalnego obliczonego podanym wzorem autora i obliczonego na podstawie pomiarów aktynometrycznych.

Należy podkreślić, że promieniowanie efektywne nie było mierzone na stacji Swojec, lecz wyliczone na podstawie dokładniejszych obserwacji wg rodzajów zachmurzenia, z zastosowaniem nomogramów Boltza i Fritza dla nieba bezchmurnego, z wyliczoną przez S. Baca i S. Baranowskiego poprawką. Wielkości te były kontrolowane jako reszta bilansowa na podstawie terminowych obserwacji R i rejestrowanych wartości Q_c i albedo.

Badany okres obejmował 5 lat (1964-1968). Ustalone korelacje pomiędzy pomierzonymi lub obliczonymi z pomierzonych elementów oraz obliczonymi ze wzorów empirycznych średnimi miesięcznymi wartościami zestawiono w tabeli 1.

Jak wynika z tych danych związki korelacyjne pomiędzy miesięcznymi wartościami: Q_c i $Q_c(1-a)$ — pomierzonymi oraz obliczonymi wzorem K. Matula; R , E_m — obliczonymi na stacji na podstawie przeważającej części pomierzonych J — obliczonymi i kontrolowanymi na

Tabela 1

Współczynnik korelacji między średnimi miesięcznymi wartościami pomierzonymi i obliczonymi wzorami empirycznymi

Badany element	Współczynnik korelacji r	Średnie względne odchylenie %
Radiacja całkowita, Q_c	0,96	5,8
Radiacja pochłaniana, $Q_c (1 - a)$	0,95	6,3
Promieniowanie efektywne, f	0,73	6,6
Bilans radiacji, R	0,95	10,0
Parowanie możliwe i potencjalne, E_m i E_p	0,98	4,7

stacji oraz obliczonymi ze wzoru są ściśle. Współczynniki korelacji są wysokie, z wyjątkiem promieniowania efektywnego J , dla którego współczynnik ma wartość nieco niższą (0,73) od innych, lecz również wysoką. Średnie względne odchylenia, z wyjątkiem bilansu radiacji, nie przekraczają 7%, a w przypadku parowania możliwego i potencjalnego, odchylenie jest najniższe i nie sięga 5%, co świadczy o dużej zgodności wartości pomierzonych i obliczonych.

Ażeby sprawdzić wiarygodność wyników uzyskanych przy stosowaniu wzorów ustalonych przez autora nie tylko na terenie kraju, lecz poza jego granicami, oraz porównać wartości uzyskiwane przy stosowaniu innych wzorów [13], wykonano obliczenia parowania potencjalnego w poszczególnych miesiącach w latach 1957-1961 dla Clermond-Ferrand oraz ustalono korelację pomiędzy tymi wynikami a wynikami obliczeń wykonanych przez Robelina wzorem Turca. Współczynnik korelacyjny równy 0,98 oraz średnie odchylenie równe 3,5% wykazują raczej identyczność, niż zgodność wyników.

Bardzo wysokie współczynniki korelacji, zarówno dla wartości pomierzonych i obliczonych na terenie kraju, jak i dla wartości obliczonych wzorem Matula i wzorem Turca dla Clermond-Ferrand, które leży na około 46° szerokości geograficznej w rejonie Masywu Centralnego, wskazują na uniwersalność wzoru i jego przydatność do określania parowania potencjalnego w skali obszaru i regionu.

Zgodność tę wykazano już we wcześniejszej pracy [12], gdzie wyniki pomiarów w różnych częściach kraju porównano z wynikami obliczeń wzorem autora.

Biologiczno-energetycznymi współczynnikami podziału energii promienistej α zajmowano się w badaniach wcześniejszych [7-9, 11, 12, 14]. Ustalone wcześniej wartości tych współczynników dla 4 typów gleb porównane zostaną w niniejszej pracy z wynikami badań w Stacji Badania Bilansów Wodnych IGW w Swojcu pod Wrocławiem oraz w Borowej Górze pod Warszawą z punktem badawczym w Zalesiu Borowym. W stacjach prowadzone były badania nad parowaniem, polowym zużyciem

wody oraz bilansem promieniowania. Stosowano 3 metody: ewaporometryczne, pól ustalonych (bilansu wodnego gleby) i bilansu radiacyjno-cieplnego, w celach porównawczych i dla uzyskania bardziej efektywnych wyników. Chodziło przy tym o określenie zależności pomiędzy głównymi czynnikami, decydującymi o wzroście i rozwoju roślin, przez wykorzystanie, poza powszechnie uwzględnianym prawem zachowania materii, również i prawa zachowania energii, warunkującego, jak podkreślono we wstępie, najistotniejsze zjawiska wymienionych procesów. Badania na polach ustalonych prowadzono metodą bloków losowanych z czterokrotnym powtórzeniem.

Na stacji Swojec występują gleby lekkie o wahającym się poziomie wody gruntowej od 80 cm na wiosnę do 150-180 cm w lecie i wczesną jesienią. Stacja w Zalesiu Borowym zlokalizowana została na niewielkim obszarowo torfowisku niskim (miąższość ok. 1 m), o niewielkich waha- niach zwierciadła wody gruntowej w stosunku do poziomu średniego, w okresie wegetacyjnym utrzymującym się na ok. 60-80 cm od po- wierzchni terenu. W Swojcu stosowano ewaporometry ważone IGW o po- wierzchni 3000 cm² i wysokości 80 cm; w Zalesiu Borowym ewaporo- metry ważone GGI — 1000 cm², wysokości 100 cm i regulowanym zwierciadle wody na poziomie wody gruntowej otoczenia. Doświadczenia wykonywano z sześciokrotnym powtórzeniem. Gniazda lizymetrów umie- szczone były wewnątrz poletek o identycznej okrywie roślinnej, dla uniknięcia wpływu tzw. oazy.

Badania wartości współczynników α dla 4 typów gleb przy różnych plonach pozwoliły dojść do wniosku, że w celu określenia parowania te- renowego i potencjalnego użytków zielonych * można stosować uśrednio- ne wartości dla rozpatrywanych gleb, ponieważ największe odchylenie dla jednego tylko typu gleb w przypadku niskiego plonu 30 q/ha, nie przekracza 10⁰/o (tab. 2). Natomiast dla plonów wysokich od 80 do 110 q/ha, będących przedmiotem zainteresowania przy ustalaniu per- spektywicznych potrzeb wody, odchylenia wynoszą od 2 do 5⁰/o. Potwier- dza to przyjętą zasadę, którą często można znaleźć w fachowej literatu- rze zagranicznej i krajowej, że parowanie zależy głównie od stanu i roz- woju roślin, a w niewielkim stopniu (szczególnie przy wysokich plonach) od rodzaju gleby.

Krzywa zależności uśrednionych wartości $E_t/E_m = \alpha_e$ od plonów sia- na x w q/ha ma postać funkcji wykładniczej eksponencjalnej:

$$\alpha_e = (1 - 0,63 \cdot e^{-0,0114x}),$$

która od wartości 0,5 dla plonu 30 q/ha zbliża się asymptotycznie do prostej poziomej $\frac{E_t}{E_m} = \alpha_e = 0,82$ i osiąga tę wartość, w przybliżeniu, w punkcie odpowiadającym plonowi 110 q/ha.

* Rośliny łąkowe przyjęto jako wskaźnikowe dla określenia parowania poten- cjalnego, ze względu na ich długi okres wegetacji i duże zapotrzebowanie wody.

Tabela 2

Wartości współczynników biologiczno-energetycznych a_p , w zależności od wielkości plonów siana, dla 4 rodzajów gleb oraz uśrednionych i wyrównanych funkcją aproksymującą* — średnie z okresu 2 pokosów

Plon siana q/ha	Gleby mineralne		Torf niski	Torf namulony	Uśrednione wartości dla 4 gleb	Obliczone ze wzoru
	ciężkie	średnie i lekkie				
30	0,67	0,61	0,73	0,70	0,67	0,67
40	0,72	0,66	0,78	0,76	0,73	0,73
50	0,77	0,72	0,83	0,80	0,78	0,79
60	0,82	0,77	0,88	0,85	0,83	0,84
70	0,88	0,81	0,91	0,90	0,88	0,89
80	0,93	0,85	0,98	0,95	0,93	0,92
90	0,96	0,90	0,99	0,98	0,95	0,95
100	0,98	0,94	1,00	0,99	0,97	0,98
110	1,00	0,98	1,01	1,00	1,00	1,00

*Funkcja $a_p = 1,22 (1 - 0,63 \cdot e^{-0,0114 \cdot x})$ gdzie: x — plon siana w q/ha.

Przyjęto zatem, że parowanie E_t , odpowiadające pułapowi parowania wyznaczonemu prostą $a_e = 0,82$, jest parowaniem potencjalnym określonym ze wzoru:

$$E_p = 0,82 \cdot E_m.$$

W tabeli 2 zestawiono wartości współczynników biologiczno-energetycznych a_p dla 4 rodzajów gleb, w zależności od wielkości plonów oraz wartości uśrednionych i wyrównanych funkcją aproksymującą. Ponieważ $a_p = 1,22 \cdot a_e$ funkcja ta ma zbliżony kształt do funkcji a_e (rys. 1):

$$\frac{E_t}{E_p} = a_p = 1,22 (1 - 0,63 \cdot e^{-0,0114 \cdot x}),$$

gdzie: x — plon w q/ha; przedział ważności $x \geq 30$.

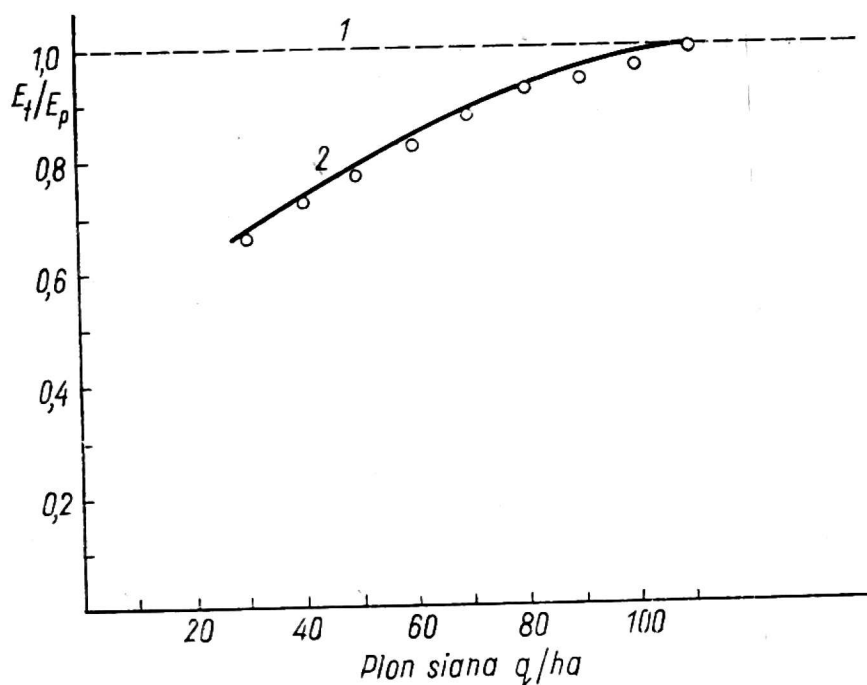
Jak wynika z tabeli i rysunku wartości funkcji rosną dość szybko, od 0,67 dla plonu 30 q/ha do 0,92 dla plonu 80 q/ha po czym przyrosty sukcesywnie maleją i krzywa zbliża się asymptotycznie do poziomej wyznaczonej wartością $a_p = 1,0$ dla plonu 110 q/ha.

A zatem można zapisać:

$$\text{gdy } x \rightarrow 110 \text{ q/ha, } \frac{E_t}{E_p} = a_p \rightarrow 1,0, E_t = E_p.$$

W celu porównania wyników wcześniej ustalonych z niektórymi wynikami badań w Stacji Swojec i w punkcie badawczym Zalesie Borowe zestawiono:

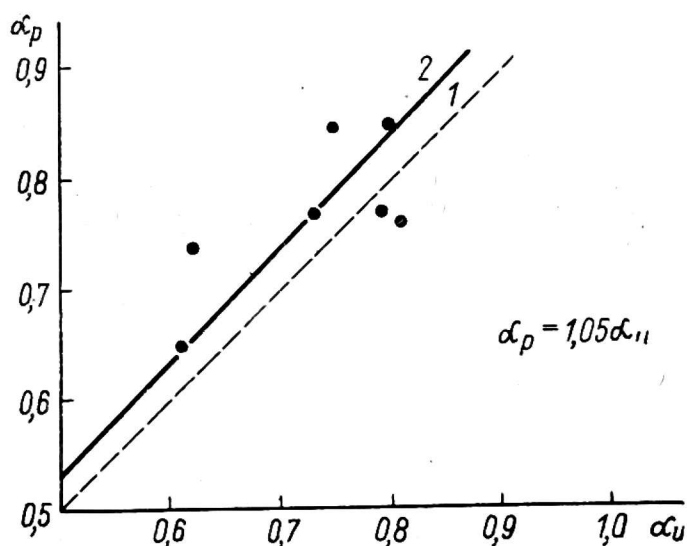
— wartości parowania terenowego E_t i potencjalnego E_p średnie z okresu V-VIII w poszczególnych latach, pomierzone w ewaporometrach,



Rys. 1. Zależność uśrednionych dla 4 gleb wartości współczynnika biologiczno-energetycznego $\left(\alpha_p = \frac{E_t}{E_p}\right)$ od plonów siana (x): 1 — poziom parowania potencjalnego, 2 — wykres funkcji $\alpha_p = 1,22 (1 - 0,63 \cdot e^{-0,0114 \cdot x})$

dla roślinności łąkowej nie nawadnianej i nawadnianej o dwóch poziomach nawożenia (tab. 3 i 4);

— wartości współczynników α , wcześniej ustalonych (α_u) i z pomiarów w ewaporometrach α_p oraz plonów siana z 2 pokosów, z łąki nie nawadnianej (tab. 5, rys. 2);

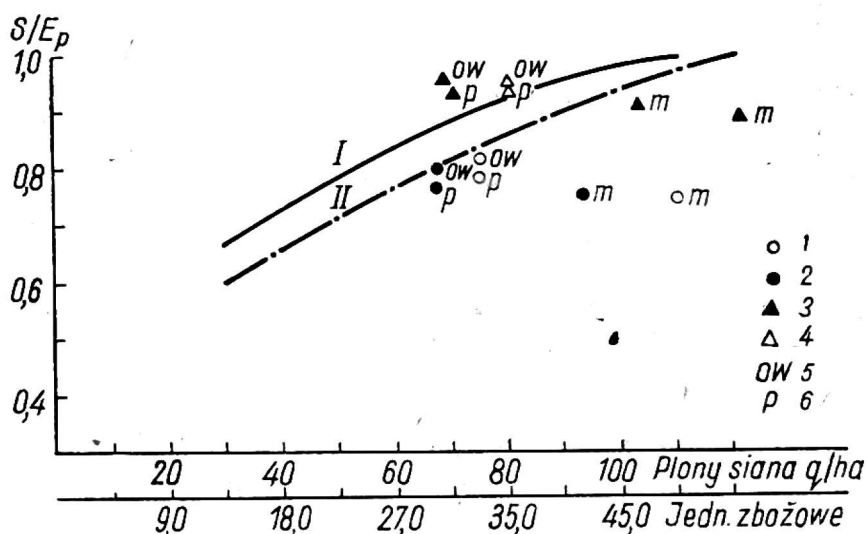


Rys. 2. Zależność między wartościami współczynników biologiczno-energetycznych z pomierzonymi w ewaporometrach (α_p) i ustalonymi wcześniej (α_u). Stacja Swojec — roślinność łąkowa nie nawadniana; nawożenie podstawowe NPK; 1 — linia środkowa, 2 — wykres funkcji $\alpha_p = f(\alpha_u)$

— wartości stosunku zużycia polowego wody S do parowania potencjalnego E_p , plonów w q/ha i w jednostkach zbożowych Woermana oraz

jednostkowego zużycia wody dla 5 roślin nie nawadnianych i nawadnianych, przy 2 poziomach nawożenia (tab. 6, rys. 3);

— wartości parowania terenowego E_t średnie z 4 lat z okresu V-VIII, pomierzone w ewaporometrach GGJ-B-1000 dla ugoru i ziemi porośniętej roślinnością łąkową, bez nawożenia i nawożoną oraz wielkości plonów (tab. 7, rys. 4).



Rys. 3. Zależność stosunków polowego zużycia wody do parowania potencjalnego S/E_p od plonów: I — krzywa uśredniona dla roślinności łąkowej, II — krzywa j.w. dla gleby średniej i lekkiej; rośliny: 1 — nie nawadniane, nawożone NPK, 2 — nie nawadniane, nawożone 2NPK, 3 — nawadniane, nawożone NPK, 4 — nawadniane, nawożone 2NPK, 5 — owies, 6 — pszenica, 7 — mieszanka (m)

Z tabeli 5 i rysunku 2 wynika, że wcześniej ustalone (α_u) oraz wynikające z pomiarów sześciolletnich w ewaporometrach (α_p) wartości współczynników biologiczno-energetycznych dla roślin nie nawadnianych, nawożonych dawką NPK, są bardzo zbliżone. Prosta regresji ma równanie: $\alpha_p = 1,05\alpha_u$.

Jak wynika z rysunku 5 wartości α_p są przesunięte w kierunku od krzywej charakteryzującej gleby lekkie do krzywej uśrednionej.

Średnie z 6 lat wartości α_p dla roślin łąkowych nawożonych podstawową i podwójną dawką NPK są identyczne (0,76), natomiast plony są o 19,3 q/ha , czyli o 34% większe.

Również w przypadku roślin nawadnianych α_p przy nawożeniu podstawową i podwójną dawką NPK są identyczne (0,95), natomiast plony są o 30,0 q/ha , czyli o 43% większe.

W przypadku roślin łąkowych nawadnianych osiągany jest pułap parowania potencjalnego, przy plonach 110-120 q/ha . Jednak wartości średnie z lat badań znajdują się poniżej tego pułapu (0,95). Punkty odpowiadające roślinom nawadnianym i nawożonym podwójną dawką NPK, rozmieszczone są wzdłuż górnej gałęzi krzywej uśrednionej (rys. 5).

W Zalesiu Borowym, na glebach torfowych, uzyskano analogicznie identyczne wartości α_p z czterolecia = 0,89 dla roślin łąkowych nie nawożonych i nawożonych podstawową i podwójną dawką nawozów.

Tabela 3

Zestawienie wyników badań prowadzonych na łące nie nawadnianej w Swojcu, nawożonej podstawową (120 kg NPK) i podwójną dawką NPK. Ewaporometry o pow. 3000 cm²

Rok	Badany czynnik*	NPK		2 NPK	
		suma lub średnie V-VIII	plon q/ha	suma lub średnie V-VIII	plon q/ha
1964	<i>P</i>	353,5			
	ΔW	-4,5			
	E_t	319,3			
	E_p	428,5			
	E_t/E_p	0,74	31,6		
1965	<i>P</i>	390,1			
	ΔW	-37,2			
	E_t	330,0			
	E_p	385,3			
	E_t/E_p	0,85	61,0		
1966	<i>P</i>	346,4		346,4	
	ΔW	+3,3		+1,1	
	E_t	305,7		301,4	
	E_p	404,4	69,2	404,4	92,2
	E_t/E_p	0,76		0,74	
1967	<i>P</i>	234,3		234,3	
	ΔW	-95,8		-109,6	
	E_t	327,8		334,6	
	E_p	426,0	64,8	426,0	75,4
	E_t/E_p	0,77		0,79	
1968	<i>P</i>	320,1		320,1	
	ΔW	-50,9		-53,6	
	E_t	345,3		360,3	
	E_p	404,4		404,4	
	E_t/E_p	0,85	67,4	0,89	101,8
1969	<i>P</i>	217,8		217,8	
	ΔW	-54,9		-39,5	
	E_t	272,5		256,8	
	E_p	417,0	26,2	417,0	35,2
	E_t/E_p	0,65		0,62	
Średnie	<i>P</i>	279,6		279,6	
	ΔW	-49,6		-50,4	
1966-1969	E_t	312,8		313,3	
	E_p	412,9		412,9	76,2
	E_t/E_p	0,76	56,9	0,76	
Średnie	<i>P</i>	310,3			
	ΔW	-40,0			
1964-1969	E_t	316,8		—	—
	E_p	410,9			
	E_t/E_p	0,77	53,4		

**P* — opad, ΔW — przyrost retencji, E_t — parowanie terenowe, E_p — parowanie potencjalne.

Tabela 4

Wyniki badań na łące nawadnianej w Swojcu, nawożonej podstawową 120 kg NPK i podwójną dawką NPK. Ewaporometry o pow. 3000 cm²

Rok	Badany czynnik*	NPK		2 NPK	
		suma lub średnie V-VIII	plon q/ha	suma lub średnie V-VIII	plon q/ha
1966	<i>P</i> + dawka nawodnienia	460,4		460,4	
	ΔW	-17,1		-34,7	
	E_t	358,6		380,5	
	E_p	404,4		404,4	
	E_t/E_p	0,89	82,2	0,95	107,3
1967	<i>P</i> + dawka nawodnienia	379,3		379,3	
	ΔW	-79,5		-76,4	
	E_t	440,5		437,6	
	E_p	426,0		426,0	
	E_t/E_p	1,03	76,0	1,03	101,4
1968	<i>P</i> + dawka nawodnienia	449,1		449,1	
	ΔW	+41,7		+50,7	
	E_t	417,6		401,9	
	E_p	404,4		404,4	
	E_t/E_p	1,03	81,2	0,99	119,8
1969	<i>P</i> + dawka nawodnienia	367,8		367,8	
	ΔW	-6,9		-0,6	
	E_t	358,1		346,1	
	E_p	417,0		417,0	
	E_t/E_p	0,86	40,1	0,83	58,1
Średnie 1966-1969	<i>P</i> + dawka nawodnienia	414,1		414,1	
	ΔW	-15,4		-15,2	
	E_t	393,7		391,5	
	E_p	412,9		412,9	
	E_t/E_p	0,95	69,9	0,95	96,6

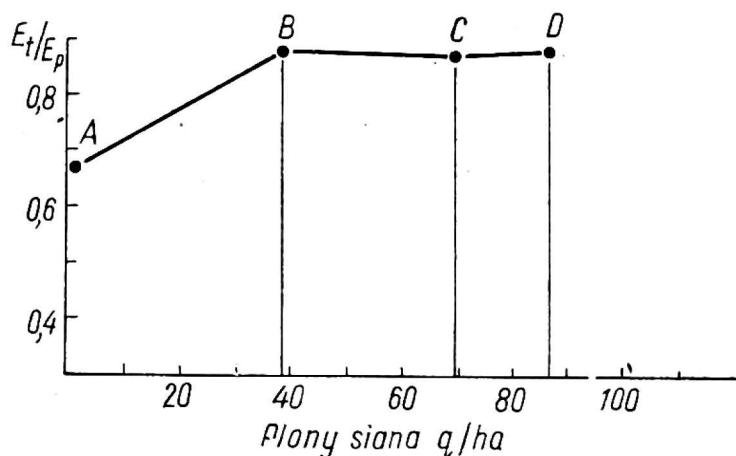
*Objaśnienia jak w tab. 3.

Odpowiednie wartości plonów wynoszą 37,5, 69,0, 85,4 q/ha. Warto podkreślić, że w roku suchym (1969), po ulepszonym zagospodarowaniu i doborze odpowiednich mieszanek traw, plon wynosił 115 q/ha.

Średnie wartości α_p dla nawożenia podstawową dawką NPK i plonu 69,0 q/ha nakłada się na krzywą uśrednioną; przy nawożeniu dawką podwójną jest przesunięta w prawo (rys. 5).

Tabela 5
Wartości współczynników biologiczno-energetycznych ustalonych (a_u) i z pomiarów w ewaporometrach (a_p) dla łąki nie nawadnianej w Swojcu oraz plony siana

Rok	a_u	a_p	Plon siana z 2 pokosów q/ha
1964	0,62	0,74	31,6
1965	0,77	0,85	61,0
1966	0,81	0,76	69,2
1967	0,79	0,77	64,8
1968	0,80	0,85	67,4
1969	0,61	0,65	26,2
Średnie 1964-1969	0,73	0,77	53,4



Rys. 4. Plony i wartości E_t/E_p z okresu dwóch pokosów (średnie z lat 1965-1969) dla ugoru — A ziemi porośniętej roślinnością łąkową, bez nawożenia — B, nawożonej dawką NPK — C, nawożonej dawką 2NPK — D. Stacja Zalesie Borowe

Ponieważ w warunkach Swojca wartości polowego zużycia wody S za okres wegetacyjny niewiele się różnią od wartości parowania potencjalnego E_p , stosunki $\frac{S}{E_p}$ oraz $\frac{E_t}{E_p}$ są porównywalne.

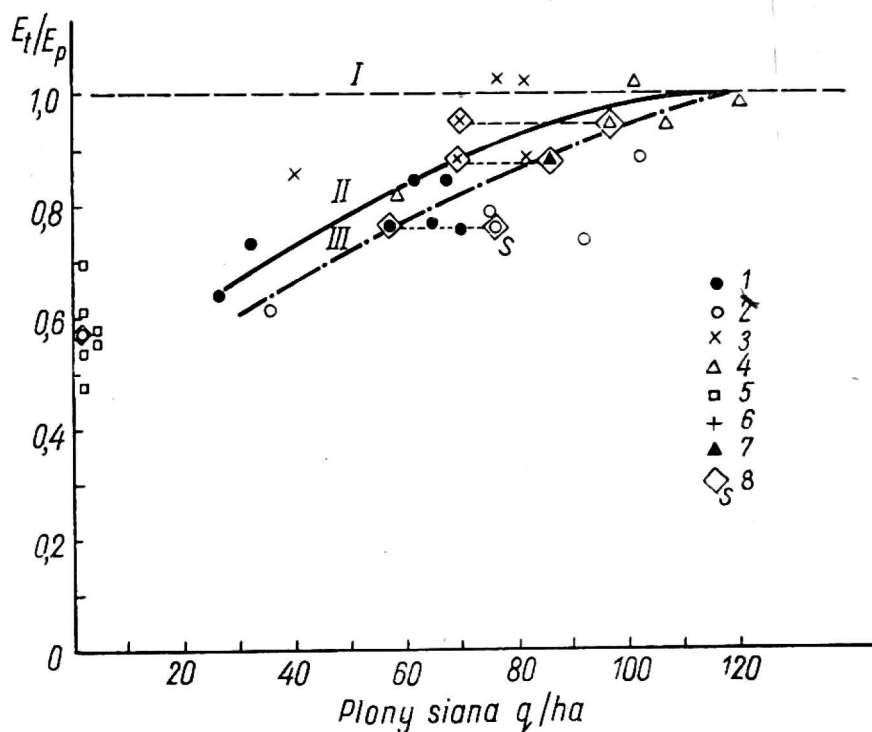
Analizując tabelę 6 i rysunek 3 należy podkreślić, że wartości stosunku polowego zużycia wody do parowania potencjalnego, średnio dla wszystkich roślin polowych, są identyczne w przypadku dawki NPK i 2NPK i wynoszą 0,73 dla roślin nie nawadnianych i 0,93 dla nawadnianych.

Wartości te dla zbóż układają się w bezpośrednim sąsiedztwie krzywej 2 dla gleb lekkich, w przypadku roślin nie nawadnianych i krzywej 1 — uśrednionej, w przypadku roślin nawadnianych.

Tabela 6

Wyniki badań prowadzonych w Swojcu nad połowym zużyciem wody (S) przez rośliny uprawne nie nawadniane (a) i nawadniane (b), nawożone podstawową i podwójną dawką NPK — średnie z lat 1966-1969

Roślina	Użytek	NPK						2 NPK						Stosunek w % rubryk			
		S		plon		zużycie jednostkowe mm/j.z.	S E _p	q/ha	j.z. Woermana	zużycie jednostkowe mm/j.z.	q/ha	j.z. Woermana	S E _p	7:3	8:4	7b:3a	8b:4a
		3	4	5	6												
Owies	a	0,80	26,6	29,6	9,8	0,82	29,2	32,6	9,2	103	110						
	b	0,96	26,8	29,8	11,7	0,95	31,0	34,5	9,9	99	115						
	b/a %	120	100			116	106			97	106						
Pszenica	a	0,76	26,6	29,6	9,0	0,79	29,5	32,9	8,4	104	110						
	b	0,94	27,9	31,2	10,5	0,96	30,9	34,5	9,8	102	110						
	b/a %	124	104			121	105			97	101						
Ziemniaki	a	0,74	303,7	76,0	4,3	0,71	334,5	85,0	3,6	96	112						
	b	0,91	327,1	82,0	4,9	0,92	362,2	91,0	4,5	101	110						
	b/a %	122	108			130	106			106	98						
Mieszanka i łubin	a	0,76	92,9	42,0	9,2	0,76	109,6	50,0	7,6	100	119						
	b	0,92	102,8	46,0	10,0	0,90	121,4	55,0	8,3	98	118						
	b/a %	120	111			118	110			98	100						
	średnie	$\frac{a}{b}$			$\frac{a}{b}$	$\frac{0,77}{0,93}$											
Trawy łąkowe	a	0,76	56,9	25,6	12,2	0,76	76,2	34,4	9,1	100	134						
	b	0,95	69,9	31,4	12,5	0,95	96,6	43,5	9,0	100	138						
	b/a %	125	123		105	125	127		99	100	106						



Rys. 5. Zależność wartości stosunków E_t/E_p z okresu wegetacyjnego (średnie z 4 i 6 lat) od plonów siana: I — poziom parowania potencjalnego, II — krzywa wartości uśrednionych dla 4 typów gleb, III — krzywa dla gleb mineralnych średnich i lekkich; rośliny: 1 — nie nawadniane, nawożone NPK, Swojec; 2 — nie nawadniane, nawożone 2NPK, Swojec; 3 — nawadniane, nawożone NPK, Swojec; 4 — nawadniane, nawożone 2NPK, Swojec; 5 — wartości ugoru dla ugoru, Swojec; 6 — nie nawadniane, nawożone NPK, Zalesie Borowe; 7 — nie nawadniane, nawożone 2NPK Zalesie Borowe; 8 — średnie z n lat badań

Tabela 7
Wyniki badań prowadzonych w Zalesiu Borowym uśrednione z lat 1965-1969. Ewaporometry GGJ-B-1000 (pow. 1000 cm²)

Badany czynnik*	Miejsce prowadzenia badań	Sumy lub średnie V-VIII	Średni plon q/ha
P		287,2	
E_p		417,7	
	ugór	282,1	0
	łąka		
E_t	nie nawożona	371,2	37,5
	nawożona NPK	364,6	69,0
	nawożona 2NPK	369,8	85,4
	ugór	0,68	
	łąka		
E_t	nie nawożona	0,89	
E_p	nawożona NPK	0,88	
	nawożona 2NPK	0,89	

* P — opad, E_t — parowanie terenowe, E_p — parowanie potencjalne.

Warto przytoczyć, że zużycie wody przez zboża i ziemniaki, wyrażone w mm na jednostkę zbożową, przy zwiększonym nawożeniu i nawodnieniu, zmienia się nieznacznie w stosunku do roślin nawożonych podstawową dawką NPK i nie nawodnionych. Natomiast w przypadku mieszanki i traw łąkowych reagujących silnie na nawodnienia, zużycie jednostkowe spada. Wskaźniki wzrostu zużycia wody i wzrostu plonów dla pierwszej grupy roślin również mają wartości zbliżone, natomiast w przypadku drugiej grupy — wzrostowi zużycia wody 118 i 125% odpowiada 125 i 170% wzrostu plonów. A zatem, w warunkach Swojca, roślinami najbardziej reagującymi na nawożenie i nawodnienia są mieszanka i trawy łąkowe.

Charakterystyczny jest fakt, że wśród roślin słabo reagujących na zwiększone nawożenie i nawodnienia są ziemniaki, których parowanie jednostkowe jest 2,5-krotnie niższe od parowania zbożowych i 3-krotnie niższe od roślin łąkowych. Oznacza to, że mając odpowiednie warunki środowiskowe i przy odpowiedniej uprawie, rośliny te wykorzystują na tworzenie masy 2-3-krotnie więcej energii słonecznej.

Skutek jest taki, że w warunkach parowania potencjalnego trawy nawadniane osiąga 43,5 jednostek zbożowych, a ziemniaki nawadniane 91,0.

Do podobnych efektów można by dojść przez zastosowanie np. nowych wysokoplennych odmian pszenicy, a także, w przypadku użytków zielonych, przez dobór odpowiednich stanowisk, mieszanek traw oraz struktury i poziomu nawożenia.

PODSUMOWANIE

Badania wykazały, że przez optymalne uwilgotnienie gleby, stwarzane są warunki do optymalnego podziału energii promienistej słońca, przy którym występuje parowanie równe potencjalnemu i możliwie największe w danych warunkach agrotechnicznych, wykorzystanie energii na tworzenie masy organicznej oraz najmniejsze parowanie jednostkowe.

Wyznaczane dla wskaźnikowej rośliny — traw łąkowych — parowanie potencjalne, określone na podstawie bilansu radiacyjno-cieplnego, można uznać za kompleksowy wskaźnik klimatyczny. Prawidłowo określone w odniesieniu do tego parowania biologiczno-energetyczne współczynniki parowania, wyznaczające parowanie terenowe, mają również charakter uniwersalny w skali dużych obszarów.

Wyniki badań w Swojcu i Zalesiu Borowym potwierdziły prawidłowość wcześniej ustalonej zależności stosunków E_t/E_p od plonów roślinności łąkowej w postaci:

$$E_t/E_p = \alpha_p = 1,22 (1 - 0,63 \cdot e^{-0,0114 \cdot x})$$

gdzie: x — plon siana q/ha; przy $x \geq 30$ q/ha pod warunkiem, że górna gałąź krzywej odpowiada roślinności nawadnianej, przy dawce nawozów ponad 200 kg NPK (rys. 5).

Badania wykazały, że dla wszystkich bez wyjątku roślin podwojenie ilości nawozów powoduje większe lub mniejsze powiększenie plonów przy takiej samej wielkości parowania. Wpływa to nieraz na znaczne obniżenie parowania jednostkowego.

W przypadku roślin polowych nawadnianych i przy podwójnej dawce nawożenia NPK parowanie jest zbliżone do E_p ($0,93 E_p$) wyznaczonego dla traw. Również zbliżony jest plon średni (z wyjątkiem ziemniaków) wyrażony w jednostkach Woermana.

Rośliny słabo reagujące na nawodnienia (zboża, ziemniaki) mają zbliżony przyrost zużycia wody do przyrostu plonu, natomiast w przypadku roślin reagujących silniej na nawodnienia (mieszanka, trawy), wzrostowi zużycia wody 118 i 125% odpowiada przyrost plonów 125 i 170%.

Na zakończenie trzeba podkreślić, że zasadniczy wpływ na podział energii promienistej słońca mają stosunki wodne środowiska oraz biologiczne, a zwłaszcza genetyczne właściwości roślin, decydujące o stopniu wykorzystania energii na tworzenie masy roślinnej. W związku z tym prace badawcze powinny być ukierunkowane na interdyscyplinarne badanie tych niezmiernie złożonych procesów, przy wykorzystaniu cybernetyki, modelowania fizycznego i matematycznego oraz automatyzacji pomiarów i przetwarzania danych.

LITERATURA

1. Bac S. (jun.): Badania nad zależnością parowania z wolnej powierzchni wodnej, parowania terenowego, ewapotranspiracji potencjalnej. Pr. Komit. Gosp. Wod. t. 10: 1969.
2. Bac S. (jun.), Baranowski S.: Studia nad wielkością i przebiegiem albedo podstawowych powierzchni rolniczych. Pr. IGW (w druku).
3. Budyko M. I.: Tęplotowy balans ziemnej powierzchni. Leningrad 1956.
4. Determination des besoins en eau. Essai d'irrigation. Campagne Nationale d'Amenagement de la Région du Bas-Rhone et du Languedoc, 1968.
5. Dzieżyc J., Trybała M.: Reakcje roślin różnie nawożonych na nawadnianie w różnych fenofazach. Zesz. nauk. WSR Wroc. nr 61. Melioracja 1965 z. 10.
6. Kozłowska-Szczęśna T., Paszyński J.: Wstępne opracowanie mapy albedo dla Polski. Prz. geogr. t. 37: 1965 z. 2.
7. Matul K.: Bilans radiacyjno-ciepłoty w Polsce. Warszawa 1961.
8. Matul K.: Podstawy naukowe melioracji hydrotermicznych. Pr. Komit. Inż. Gosp. Wod. t. 3: 1962.
9. Matul K.: Potrzeby wodne roślin i możliwości ich zaspokajania w związku z intensyfikacją produkcji roślinnej. Pr. Komit. Inż. Gosp. Wod. t. 7: 1964.
10. Matul K., Bac S., Baranowski S.: Określanie elementów bilansu cieplnego dla wyznaczania parowania terenowego. Pr. Komit. Gosp. Wod. t. 9: 1968.
11. Matul K., Dworska M.: Niedobory wodne użytków zielonych o 20 i 50% prawdopodobieństwa występowania. Mat. bad. IGW t. 5: 1970 z. 1.

12. Matul K., Dworska M.: Rozkład wskaźników parowania potencjalnego i opadów w latach 1948-1962 jako podstawa do obliczeń niedoborów wodnych roślin. Pr. Komit. Gosp. Wod. t. 11: 1972.
13. Matul K., Dworska M.: Synteza tematu: Badania wskaźników i norm zapotrzebowania i zużycia wody w rolnictwie. Warszawa 1970 maszyn. IGW.
14. Matul K., Kuryjańska A.: Analiza współczynników parowania użytków zielonych. Mat. bad. IGW t. 6: 1970 z. 1.
15. Robelin M.: Evaporation réelle de differents couverts végétaux bien alimentés en eau et evapotranspiration potentielle. Détermination expérimentale. Ann. Agron. 1962 nr 13 b.
16. Schmuck A.: Regiony pluwiotermiczne w Polsce. Czas. geogr. 1965 z. 3.
17. Turc L.: Mapki izolinii parowania potencjalnego. Interpretacja i metoda posługiwania się nimi. Bull. Techn. Génie Rural. 1963 nr 60. Tłum maszynopis IGW.

К. Матиль

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ ПРОВЕДЕННЫХ В ПЕРИОД 1963-1969 гг ПО МЕТОДУ РАДИАЦИОННО-ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

Резюме

Исследования эвапотранспирации проведенные по методу радиационно-теплового баланса почвы, эвапорометрическому и водного баланса почвы показали, что:

Потенциальная эвапотранспирация E_p рассматриваемая как эвапотранспирация луговых угодий в период интенсивного роста растительности, при неограниченном обеспечении водой, определенная по формуле автора:

$$E_p = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{R}{L} \cdot \Sigma t},$$

где:

R — радиационно-тепловый баланс,

L — тепло испарения,

Σt — сумма средних суточных температур,

может составлять комплексный и универсальный климатический показатель в период апрель-сентябрь.

Величины измеренные или исчисленные на основании измерения гидрометеорологических элементов в опытной станции Своец, а также исчисленные на основании эмпирических формул автора для составных частей радиационно-теплового баланса и потенциальной эвапотранспирации, очень сходные, а корреляционные зависимости точные.

Луговые травы орошаемые и удобряемые двойной дозой NPK достигают уровня потенциальной эвапотранспирации (за период май-август) при величине урожая 110-120 ц сена с гектара. Полевые культуры сильно реагирующие на орошение (напр. клеверо-злаковая смесь) дают высшие урожаи при более низком уровне эвапотранспирации — $0,9 E_p$.

Эвапотранспирация E_t составляет часть потенциальной эвапотранспирации определенной с помощью биолого-энергетических коэффициентов эвапотранспирации α_p , согласно формуле: $E_t = \alpha_p \cdot E_p$. Коэффициенты α_p имеют универсальный характер в масштабе страны для данного угодья, определяемого уровнем агро-

техники и величиной урожая. Сравнительно небольшие разницы эвапотранспирации в зависимости от вида почв делают возможным применение для более крупных луговых комплексов средних величин коэффициентов эвапотранспирации для нескольких видов почв за период май-август согласно формуле:

$$a_p = 1,22 (1 - 0,63 \cdot e^{-0,0114x}),$$

где: x — урожай сена ≥ 30 ц/га; для $x = 110$ ц/га

$a_p = 1,0$ $E = E_p$, для $x > 110$ ц/га эвапотранспирация принимает постоянную величину $= E_p$, а прибавок урожая при уменьшающейся единичной эвапотранспирации можно добиться путем усовершенствования агротехники. Ни у одной культуры удобрение двойной дозой не вызывало роста эвапотранспирации, несмотря на неоднократно значительное повышение урожая.

Периодическая поливная норма на луговые угодья в условиях потенциальной эвапотранспирации составляла в средне сухом году 145 мм, будучи гораздо ниже нормы определенной традиционным методом.

K. Matul

SOME RESULTS OF INVESTIGATIONS ON EVAPOTRANSPIRATION CARRIED OUT IN 1963-1969 BY THE RADIATION THERMIC BALANCE METHOD

Summary

The investigations on evapotranspiration carried out in the period 1963-1969 by the method of radiation-thermic balance of soil, the evaporimeter method and the method of water balance of soil have proved as follows:

Potential evapotranspiration E_p , defined as evapotranspiration of grasslands in the period of an intensive growth of their vegetation, at unlimited water supply, calculated on the basis of the author's formula:

$$E_p = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{R}{L} \cdot \Sigma t},$$

where:

R — radiation-thermic balance

L — evaporation warmth

Σt — sum of mean daily temperatures,

can be regarded as a complex and universal climatic index in the period April-September.

The values measured or calculated from the measured hydrometeorological elements at the experimental station Swojec as well as calculated on the basis of the empirical formulae of the author on elements of the radiation-thermic balance and potential evapotranspiration, are very similar and the correlation dependences exact ones.

The grassland vegetation irrigated and fertilized with double NPK rate reaches the level of potential evapotranspiration (in the period May-August) at the yield of 110-120 q hay from hectare; the field crops showing a strong response to irrigation (e.g. grass-clover mixture), give higher yields at lower evapotranspiration level — $0.9 E_p$.

The evapotranspiration E_t constitutes a part of potential evapotranspiration determined by means of biologic-energetic evapotranspiration coefficients a_p according to the formula $E_t = a_p \cdot E_p$. The a_p coefficients are of universal character in the country scale for the given land, determined by the agronomy level and yield

magnitude, while the relatively little evapotranspiration differences depending on soil kind enable to apply for larger grassland complexes the evapotranspiration coefficients averaged for several soil kinds for the period May-August, according to the formula:

$$\alpha_p = 1.22 (1 - 0.63 \cdot e^{-0,0114x}),$$

where: x — hay yield ≥ 30 q/ha. For $x = 110$ q/ha $\alpha_p = 1.0$ and $E = E_p$, for $x > 110$ q/ha evapotranspiration = E_p is constant, and the yield increment at decreasing unit evapotranspiration can be obtained by an improvement of agronomic measures. At all the crops investigated double fertilization rate did not cause any evapotranspiration increase, despite sometimes considerable yield increments.

Periodical water rate in grassland irrigation amounted in conditions of potential evapotranspiration in medium dry year to 145 mm, being much less than that determined by traditional methods.