

**Jan KOSSOWSKI**

Instytut Agrofizyki PAN  
Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences

**Problemy metodyczne pomiaru strumienia ciepła w glebie  
– weryfikacja danych względem uzyskanych inną metodą  
w wielodniowym ciągu pomiarowym**

**Methodical problems concerning soil heat flux measurement  
– verification of the data in respect to obtained by other  
method in the multiday-series of measures**

**Słowa kluczowe:** strumień ciepła w glebie, błędy pomiaru

**Key words:** soil heat flux, measurement errors

**Wprowadzenie**

Rezultaty bezpośrednich pomiarów strumienia ciepła w glebie za pomocą płytek – strumieniomierzy obarczone są z reguły znacznymi błędami. Przyczyny (źródła) tych błędów są różne i praktycznie niemożliwe do uniknięcia; co najwyżej można stosować znane już od lat metody pozwalające na pomniejszenie wpływu niektórych z nich na wyniki pomiarów (Portman 1958, Philip 1961). Wielkość sumarycznego błędu wartości gęstości strumienia ciepła w glebie mierzonych strumieniomierzami można określić poprzez porównanie ich z uzyskanymi w tym samym miejscu i czasie za pomocą innej metody uznanej za

wzorcową (np. pojemnościowej, ale i innych pośrednich metod). Jak wykazały liczne takie badania przeprowadzone w warunkach polowych, różnice gęstości strumienia ciepła otrzymanej ze strumieniomierza i metody kontrolnej są zmienne w czasie zarówno w ciągu doby, jak i z dnia na dzień. Jednocześnie stwierdzano wyraźny związek między wyznaczonymi tymi metodami wartościami strumienia w przebiegu dobowym (wysokie współczynniki korelacji), opisywany (z pewnym przybliżeniem) równaniem liniowym. Równania takie były następnie wykorzystywane do korekty danych pochodzących ze strumieniomierzy.

Należy zaznaczyć, że wartości współczynników w tego typu równaniach wyznaczonych dla poszczególnych dni (nawet niezbyt oddalonych od siebie) mogą znacznie się różnić. Jest to związane przede wszystkim ze zmiana-

mi wilgotności gleby (a przez to relacji przewodnictwa cieplnego gleby i strumieniomierzy) oraz różnym kontaktem płytek z glebą. Przy długotrwałych badaniach (np. w trakcie okresu wegetacyjnego) wynika stąd problem częstości i ulokowania w ciągu pomiarowym dni, dla których powinny być wyznaczone równania korekcyjne. Pewne jest jednak, że muszą być one powiązane z przebiegiem pogody, a zwłaszcza wystąpieniem opadów.

W przypadku trwających kilka dni okresów bez opadu, o w miarę stabilnych warunkach atmosferycznych i zbliżonym stanie fizycznym gleby, można by przyjąć równanie wyznaczone dla jednego z takich dni jako reprezentatywne dla pozostałych. Natomiast przy wystąpieniu kilkunastodniowych lub jeszcze dłuższych takich okresów wskazane by jednak było wyznaczenie równań korekcyjnych dla większej liczby dni w danym okresie. Korzystnym w takim przypadku rozwiązaniem wydaje się też być określenie relacji strumienia ciepła w glebie ze strumieniomierzy i metody kontrolnej na podstawie danych pochodzących z kilku (niekoniecznie kolejnych) dni rozpatrywanych łącznie, tj. jako jeden zbiór (Hanks i Jacobs 1971). Idąc jeszcze dalej tym trybem postępowania, można próbować wyznaczyć tylko jedno równanie korekcyjne dla danego miesiąca lub jeszcze dłuższego okresu (np. obejmującego kilka miesięcy sezonu pomiarowego). Sprawdzenie takich koncepcji dokonywania kontroli i korekty uzyskiwanych ze strumieniomierzy danych w trakcie okresów bezopadowych – pod kątem dokładności (wielkości popełnianego błędu) w określaniu średnich godzino-

wych wartości gęstości strumienia ciepła w glebie oraz ilości ciepła wnikającego do gleby w danym dniu – jest celem niniejszej pracy.

## **Materiał i metody**

Materiał obserwacyjny stanowiły wyniki pomiarów przeprowadzonych podczas sezonu wegetacyjnego 1979 na poletku bez roślin w Felinie koło Lublina (z glebą lessopodobną). W miesiącach maj – lipiec tego roku zanotowano 5 trwających co najmniej 3 dni okresów bezopadowych. Występowały one w dniach: 10–24 V, 29 V – 13 VI, 22–25 VI, 2–5 i 11–15 VII. Dwa najdłuższe spośród nich, a także dwa ostatnie wybrane zostały jako najbardziej stosowne do rozpatrywania w kontekście przedłożonego wyżej celu.

Szczegółowy opis metodyki badań polowych zamieszczono we wcześniejszej pracy (Kossowski 2005). Warto jednak nadmienić, że w bezpośrednich pomiarach strumienia ciepła w glebie używano dwóch połączonych ze sobą płytek strumieniomierzy (firmy Middleton) umieszczonych na głębokości 1 cm pod powierzchnią gleby, a równocześnie gęstość strumienia ciepła w glebie (średnia w godzinnych przedziałach czasu) wyznaczana była metodą pośrednią, kombinowaną ze zmian zawartości ciepła w warstwie 1–20 cm oraz wartości strumienia ciepła na dolnej granicy tej warstwy, które określano metodą gradientową. Podstawą dokonywania korekty wartości gęstości strumienia ciepła uzyskanych ze strumieniomierzy ( $q_{sf}$ ) były równania regresji liniowej, opisujące związek tychże

wartości z wartościami gęstości strumienia ciepła otrzymanymi metodą pośrednią ( $q_a$ ), wyznaczone dla:

- pojedynczych dni (w liczbie 12, w tym po 4 dni w okresach bezopadowych 10–24 maja i 29 V – 13 VI, a po 2 dni w okresach 2–5 i 11–15 VII), na podstawie średnich godzinowych danych  $q_a$  i  $q_{sf}$  w ciągu doby,
- poszczególnych okresów bezopadowych (przy czym okresy w lipcu potraktowano łącznie), na podstawie zbioru średnich godzinowych wartości  $q_a$  i  $q_{sf}$  z czterech wybranych dni (razem), ale tylko z okresu dziennego (w godzinach 5–20),
- dla całego okresu badań (ale mając na uwadze wyłącznie dni bez opadu), na podstawie danych z okresów dziennych wszystkich 12 rozpatrywanych dni.

Ponadto korektę wartości  $q_{sf}$  z poszczególnych dni dokonywano na podstawie równań otrzymanych dla jednego (wybranego) dnia w danym okresie bezopadowym, który potraktowano jako reprezentatywny dla tego okresu, tj.: z 15 V dla innych dni w okresie między 10 a 24 maja, z 6 VI dla dni z okresu 29 V – 13 VI, a z 5 V – dla dni w obu okresach bezopadowych w lipcu (Kossowski 2005).

Dane skorygowane według równania otrzymanego dla określonego dnia oznaczano dalej jako  $q_{ri}$ , według równania z dnia przyjętego za reprezentatywny dla danego okresu jako  $q_{r1}$ , według równania uzyskanego na podstawie zbioru danych z czterech dni w obrębie właściwego dla rozpatrywanego dnia okresu bezopadowego (w maju, czerwcu lub lipcu) jako  $q_{r4}$ , a według równa-

nia wyznaczonego na podstawie danych z wszystkich 12 dni – jako  $q_{r12}$ . Podobnie oznaczano sumy ciepła wnikającego do gleby w poszczególnych dniach ( $\Sigma q^+$ ), które – aby uzyskać dokładniejsze dane – obliczane były ze średnich półgodzinnych wartości strumienia o znaku dodatnim (przyjętym dla strumienia skierowanego od powierzchni w głąb gleby).

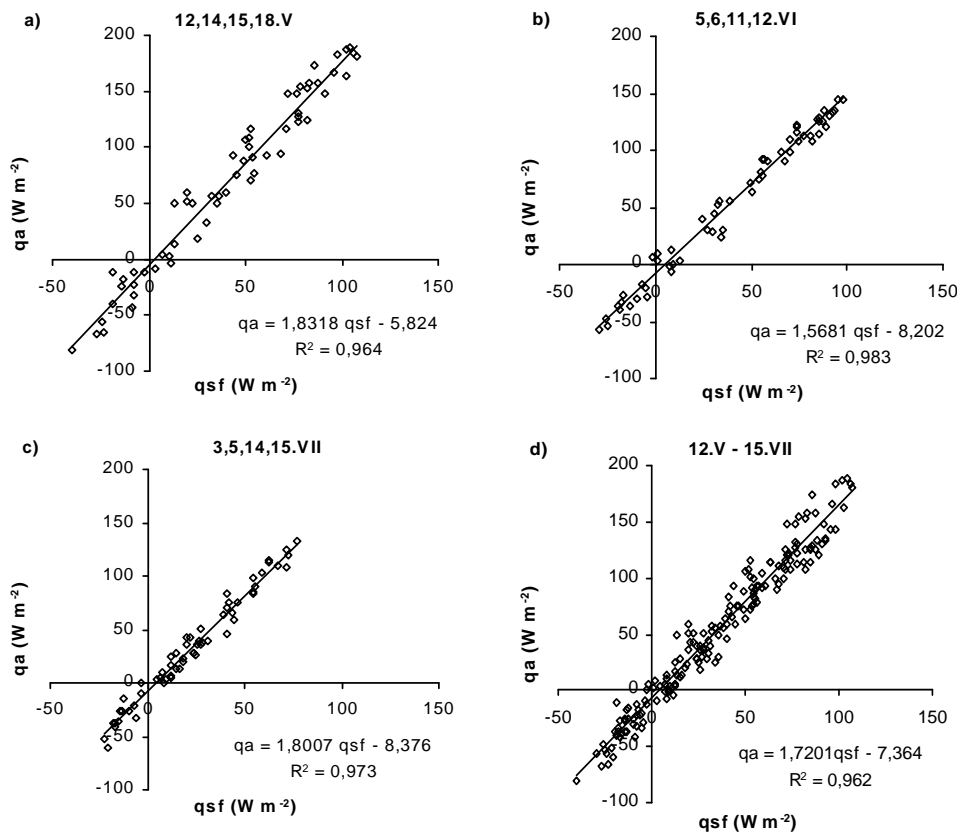
Analizy porównawcze otrzymanych wyników przeprowadzono głównie pod kątem zróżnicowania wielkości błędu względnego wartości  $q_{sf}$  (także  $\Sigma q^+_{sf}$ ) wobec danych skorygowanych przy użyciu różnych (omówionych wyżej) równań. Błąd ten obliczano według wzoru:

$$RE = (q_{ri} - q_{sf})/q_{ri} \cdot 100 [\%]$$

gdzie  $q_{ri}$  oznacza wartość strumienia ciepła w glebie, skorygowaną według określonego rodzaju równania.

## Wyniki

Wartości współczynników w równaniach regresji wyznaczonych dla pojedynczych dni były zróżnicowane, jednakże w obrębie danego okresu bezopadowego nie różniły się one tak znacznie, jak między dniami pochodzącymi z różnych okresów. I tak współczynniki kierunkowe ( $a$ ) w równaniach otrzymanych dla rozpatrywanych 4 dni w maju miały wartości od 1,79 do 1,88 przy wartościach współczynnika  $b$  między  $-3,3$  a  $-7,2$ , podczas gdy w dniach z okresu bezopadowego w czerwcu kształtowały się one odpowiednio: w przedziale od 1,58 do 1,63 oraz  $-8,2$  i  $-12,9$ , natomiast w wybranych dniach



RYSUNEK 1. Związek między średnimi godzinowymi wartościami strumienia ciepła w glebie (na głębokości 1 cm) uzyskanymi z pomiarów strumieniomierzami ( $q_{sf}$ ) i metodą pośrednią ( $q_a$ ) podczas okresu dziennego (godz. 5–20) wybranych czterech dni w 1979 roku w miesiącu: a – maju, b – czerwcu, c – lipcu, d – tychże 12 dni łącznie

FIGURE 1. Relation between mean hourly values of heat flux in soil (at 1 cm depth) obtained from measurement by flux plates ( $q_{sf}$ ) and indirect method ( $q_a$ ) during daily period (from 5 to 20 hours) of four selected days in 1979: a – in May, b – in June, c – in July, d – all these twelve days together

lipca między 1,72 a 1,88 oraz  $-5,7$  a  $-11,3$ . Równocześnie okazało się, że linie regresji z dni danego okresu bezopadowego tworzyły pęk bardzo zbliżonych do siebie prostych.

Owe niewielkie w istocie różnicowanie relacji wartości  $q_{sf}$  i  $q_a$  (i parametrów równań) w rozpatrywanych dniach danego okresu bezopadowego, przy większej jednocześnie rozbieżności między okresami, uwidoczniło się przy

określaniu równań korekcyjnych na podstawie zbiorów łącznych danych z tych dni (rys. 1a, b, c). Widoczny na wykresach stosunkowo nieduży rozrzut punktów wokół linii regresji oraz wysokie współczynniki korelacji i determinacji nie tylko świadczą o dopuszczalności stosowania takiego podejścia (tj. łączenia danych wyjściowych) przy wyznaczaniu równań korekcyjnych, ale też stanowią dobrą przesłankę odnośnie

do wielkości błędów korygowanych przy ich użyciu danych. Relatywnie najgorzej pod tym względem przedstawia się sytuacja w pierwszym (majowym) okresie, na co zwracano uwagę i próbowano wyjaśnić we wcześniejszej pracy (Kossowski 2005). Potwierdzają to również, odnoszące się do omawianych równań, wartości standardowego błędu szacowania (SEE) strumienia ciepła w glebie:  $14,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  w przypadku okresu majowego i  $8,3$  i  $8,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  w kolejnych okresach. Warto przy tym dodać, że wartości SEE odnotowane przy wyznaczaniu równań z pojedynczych dni w danym okresie były z reguły mniejsze. Związek średnich godzinowych wartości strumienia ciepła w glebie, uzyskanych z pomiarów strumieniomierzami i metodą pośrednią, wyznaczony na podstawie danych z wszystkich 12 rozpatrywanych dni (łącznie), przedstawiono na rysunku 1d. Z oczywistych względów współczynniki opisującego go równania, a także standardowy błąd szacowania ( $12,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) mają wartości pośrednie w porównaniu do otrzymanych dla poszczególnych okresów.

Porównanie wartości gęstości strumienia ciepła w glebie zmierzonych strumieniomierzami i po dokonaniu ich korekty za pomocą wyznaczonych równań ograniczono tu do najwyższych w ciągu dnia wartości średnich godzinowych. Także tych tylko danych (maksimów dobowych) dotyczyły wartości błędu względnego (RE), gęstości strumienia ciepła uzyskanej ze strumieniomierzy ( $q_{sf}$ ) wobec tejże gęstości skorygowanej przy użyciu określonego rodzaju równania ( $q_{ri}$ ), które zestawiono w tabeli 1. Choć z reguły nie są one

równoznaczne z maksymalnym w ciągu danego dnia takim błędem (Kossowski 2005), pozostają na tyle charakterystyczne dla rozpatrywanych dni, że przy omawianiu wyników poprzestano na nich.

Błąd względny maksymalnych w ciągu dnia wartości średnich godzinowych gęstości strumienia ciepła w glebie uzyskanych z pomiarów strumieniomierzami (RE  $q_{sf}$ ) obliczony w odniesieniu do wartości strumienia skorygowanych według równań wyznaczonych dla danego dnia ( $q_{ri}$ ) był nie mniejszy niż 30%, ale sięgał aż 45%. Podkreślić należy wyraźne różnice w wartościach tego błędu, jakie zaznaczyły się między rozpatrywanymi okresami bezopadowymi, zwłaszcza majowym (gdzie wynosił średnio 43,5%) a czerwcowym (średni błąd 32,7%). W dniach z okresów bezopadowych w lipcu zanotowano większą średnią wartość błędu (39,5 %) niż w czerwcu, przy czym – w odróżnieniu do wcześniejszych okresów, podczas których błąd w kolejnych dniach był mało zróżnicowany i wykazywał niewielką tendencję wzrostową – wielkość błędu w poszczególnych dniach znacząco się różniła (określone znaczenie miały tu warunki pogodowe panujące podczas rozpatrywanych dni).

Przy stosowaniu dwóch innych wariantów dokonywania korekty uzyskiwanych ze strumieniomierzy danych (tj. według równania z dnia uznanego za reprezentatywny dla danego okresu bezopadowego i równania otrzymanego na podstawie zbioru danych z czterech dni w okresie) otrzymano błędy podobnej wielkości i o takim samym niemal zróżnicowaniu między okresami, jak w przypadku danych skorygowanych za

TABELA 1. Zestawienie największych w ciągu dnia średnich godzinowych wartości gęstości strumienia ciepła w glebie uzyskanych z pomiarów strumieniomierzami ( $q_{sf}$ ) i po ich korekcie za pomocą równań wyznaczonych dla pojedynczych dni ( $q_{r1}$ ) oraz błędu względnego (RE) wartości  $q_{sf}$  wobec danych skorygowanych przy zastosowaniu różnych równań: równania dla poszczególnych dni ( $q_{r1}$ ), równania z dnia przyjętego za reprezentatywny dla danego okresu ( $q_{r1r}$ ), równania otrzymanego na bazie danych z czterech dni w danym miesiącu ( $q_{r4}$ ) i równania z dwunastu dni w sezonie ( $q_{r12}$ )

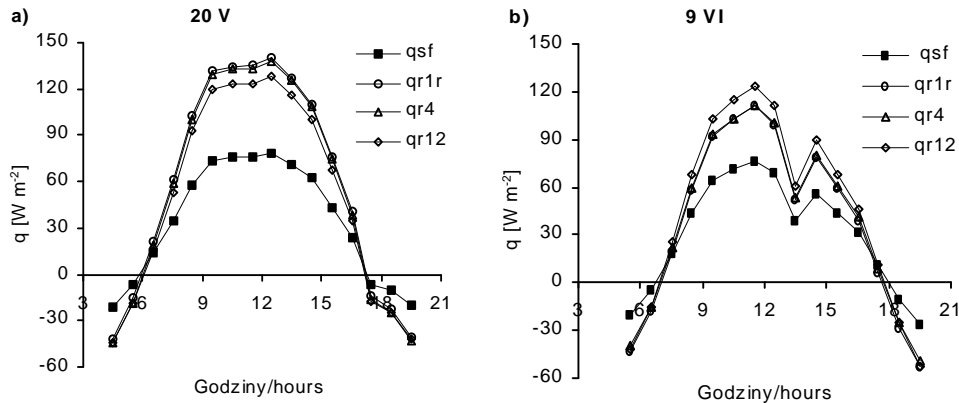
TABLE 1. Comparison of the maximal (for a day) mean hourly values of soil heat flux density obtained from measurement by heat flux plates ( $q_{sf}$ ) and after their correction by equations for single day ( $q_{r1}$ ), as well as the relative error (RE) of  $q_{sf}$  values versus these corrected using different equations: equation determined for individual day ( $q_{r1}$ ), equation from day that was assumed as representative for a given period ( $q_{r1r}$ ), equation from four days data in a given month ( $q_{r4}$ ) and twelve days during the season ( $q_{r12}$ )

Dzień Day	$q_{sf}$ [W·m <sup>-2</sup> ]	$q_{r1}$ [W·m <sup>-2</sup> ]	RE $q_{sf}$ [%]			
			v. $q_{r1}$	v. $q_{r1r}$	v. $q_{r4}$	v. $q_{r12}$
12 V	91,6	159,2	42,5	44,0	43,5	39,0
14 V	106,0	186,0	43,0	44,1	43,7	39,4
15 V	107,4	192,3	44,1	44,1	43,7	39,5
18 V	83,3	149,4	44,2	43,9	43,3	38,7
5 VI	85,2	123,3	30,9	32,2	32,1	38,8
6 VI	93,2	138,4	32,7	32,7	32,4	39,0
11 VI	87,5	129,7	32,5	32,3	32,2	38,9
12 VI	97,9	150,1	34,8	32,9	32,6	39,2
3 VII	76,6	138,0	44,5	39,5	40,9	38,4
5 VII	54,8	87,3	37,2	37,2	39,3	36,9
14 VII	71,8	121,1	40,7	39,2	40,6	38,2
15 VII	54,6	84,8	35,6	37,2	39,3	37,0

pomocą równań wyznaczonych indywidualnie dla każdego dnia. Jednakże w obrębie danego okresu błędy były niemal zupełnie wyrównane, co jest naturalnie konsekwencją korzystania z jednego równania (odpowiednio wybranego bądź wyznaczonego w określonym trybie) przy korekcie danych z wszystkich dni w okresie. Z tego samego powodu błędy względne wartości strumienia ciepła ze strumieniomierzy wobec wartości skorygowanych według równania otrzymanego na podstawie danych z wszystkich rozpatrywanych dni ( $q_{r12}$ ) były praktycznie ujednoczone w ciągu całego sezonu (rozstęp błędów zaledwie 2,5%, przy średniej wynoszącej 38,6%). Należy podkreślić, że wartości strumienia ciepła skorygowane przy stosowaniu tego równania ( $q_{r12}$ )

okazały się znacząco zaniżone (w dniach okresu majowego i okresów w lipcu) lub zawyżone (w dniach okresu czerwcowego) w porównaniu do wartości korygowanych za pomocą innych równań. Uwaga ta odnosi się do całego przebiegu dziennego gęstości strumienia ciepła w glebie, co ilustrują wykresy na rysunku 2 (z dni nieuwzględnianych przy wyznaczaniu równań korekcyjnych).

Efekty zastosowania różnych wariantów korekty danych ze strumieniomierzy w przypadku obliczania ilości ciepła wnikającego do gleby w danym dniu (ściślej – błędy względne sum dodatnich wartości strumienia mierzonych strumieniomierzami wobec sum obliczonych z wartości skorygowanych) zaprezentowano w tabeli 2. Błąd względny



RYSUNEK 2. Przebieg dzienny gęstości strumienia ciepła w glebie uzyskanej z pomiarów strumieniomierzami ( $q_{sf}$ ) i po jej korekcie za pomocą różnych równań: równania z dnia przyjętego za reprezentatywny dla danego okresu ( $q_{r1r}$ ), równania otrzymanego na bazie danych z czterech dni w danym miesiącu ( $q_{r4}$ ) i równania z dwunastu dni w sezonie ( $q_{r12}$ ); Felin, wybrane dni z okresu bezopadowego w 1979 roku: a – w maju, b – czerwcu

FIGURE 2. Daily course of soil heat flux density obtained from measurements by flux plates ( $q_{sf}$ ) and after these values correction using different equations: the equation from the day assumed as representative for a given period ( $q_{r1r}$ ), the equation from four days in a given month ( $q_{r4}$ ) and twelve days during the season ( $q_{r12}$ ); Felin, selected days from a period without precipitation in 1979: a – in May, b – in June

TABELA 2. Zestawienie sum dodatnich wartości strumienia ciepła (skierowanego w głąb gleby) obliczonych na podstawie średnich z okresów 0,5-godzinnych wartości strumienia zmierzonych strumieniomierzami ( $\Sigma q_{sf}^+$ ) i po ich korekcie za pomocą równań wyznaczonych dla pojedynczych dni ( $\Sigma q_{r1}^+$ ) oraz błędu względnego (RE) wartości  $\Sigma q_{sf}^+$  wobec sum obliczonych z danych skorygowanych przy zastosowaniu różnych równań: równania dla poszczególnych dni ( $\Sigma q_{r1}^+$ ), równania z dnia przyjętego za reprezentatywny dla danego okresu ( $\Sigma q_{r1r}^+$ ), równania otrzymanego na bazie danych z czterech dni w danym miesiącu ( $\Sigma q_{r4}^+$ ) i równania z dwunastu dni w sezonie ( $\Sigma q_{r12}^+$ )

TABLE 2. Comparison of the sums of positive values of soil heat flux (directed into soil) calculated on the basis of mean half-hourly values of heat flux from plates ( $\Sigma q_{sf}^+$ ) and after their correction by equations for single day ( $\Sigma q_{r1}^+$ ), as well as the relative error (RE) of  $\Sigma q_{sf}^+$  values versus the sums obtained from corrected data using different equations: i.e. obtained for individual days ( $\Sigma q_{r1}^+$ ), equation from day representative for a given period ( $\Sigma q_{r1r}^+$ ), equation from four days in a given month ( $\Sigma q_{r4}^+$ ) and twelve days during the season ( $\Sigma q_{r12}^+$ )

Dzień Day	$\Sigma q_{sf}^+$ [kJ·m <sup>-2</sup> ]	$\Sigma q_{r1}^+$ [kJ·m <sup>-2</sup> ]	RE $\Sigma q_{sf}^+$ [%]			
			v. $\Sigma q_{r1}^+$	v. $\Sigma q_{r1r}^+$	v. $\Sigma q_{r4}^+$	v. $\Sigma q_{r12}^+$
12 V	2213	3765	41,2	43,3	42,1	37,0
14 V	2451	4197	41,6	43,4	42,4	37,5
15 V	2873	5095	43,6	43,6	42,8	38,0
18 V	2245	3907	42,5	43,1	41,8	36,6
5 VI	2367	3273	27,7	29,4	30,1	37,3
6 VI	2555	3632	29,7	29,7	30,2	37,4
11 VI	2239	3191	29,8	28,8	29,5	36,9
12 VI	2418	3570	32,3	29,9	30,3	37,5
3 VII	1367	2349	41,8	33,2	36,4	34,2
5 VII	1069	1498	28,6	28,6	33,5	31,5
14 VII	1945	3146	38,2	36,1	38,4	36,0
15 VII	1311	1862	29,6	30,0	34,4	32,3

sum dodatnich wartości strumienia z pomiarów strumieniomierzami ( $RE \Sigma q_{sf}^+$ ) obliczony w odniesieniu do sum wartości strumienia skorygowanych według równań wyznaczonych dla danego dnia ( $\Sigma q_{r1}^+$ ), wynoszący od 27,7 do 43,6%, a także średni błąd w kolejnych okresach (42,2% w maju, 29,9% w czerwcu i 34,6% w lipcu) okazał się nieco mniejszy niż w przypadku maksimów dziennych strumienia ciepła. Dała się i tu zauważyć tendencja wzrostowa wielkości błędu podczas kolejnych dni w okresie majowym i czerwcowym, ale też relatywnie większe zróżnicowanie błędu między rozpatrywanymi dniami w lipcu. Również błędy sum ciepła uzyskanych ze strumieniomierzy względem sum otrzymanych po korekcie danych według równania z reprezentatywnego dnia dla danego okresu bezopadowego ( $\Sigma q_{r1r}^+$ ) oraz równania wyznaczonego dla czterech dni w okresie ( $\Sigma q_{rd}^+$ ) były mniejsze w porównaniu do odnotowanych dla maksimów dziennych strumienia. Stwierdzono ponadto podobne wielkości błędów oraz ich zróżnicowanie między okresami, wyrównanie wielkości błędu w obrębie okresu majowego i czerwcowego, podczas gdy w dniach z lipca pozostał on zróżnicowany (choć w mniejszym stopniu niż po korekcie danych według równań wyznaczonych dla poszczególnych dni). Z kolei przy analizie błędów  $\Sigma q_{sf}^+$  względem  $\Sigma q_{r12}^+$  zauważono, że spodziewane ujednoczenie błędów w trakcie sezonu nie było tak zupełne, a przy tym zarówno średnie wartości błędu w poszczególnych okresach, jak i średni błąd dla wszystkich rozpatrywanych dni (36,0%) był mniejszy niż w przypadku maksimów dzien-

nych strumienia ciepła w glebie. Co jednak istotniejsze – sumy ciepła wnikaającego do gleby w danym dniu obliczone przy stosowaniu do korekty danych równania wyznaczonego na podstawie wszystkich 12 dni w sezonie okazały się albo zaniżone (w maju i niektórych dniach lipca), albo zawyżone (w czerwcu) w porównaniu do otrzymanych przy użyciu innych równań korekcyjnych.

### Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w pracy dane – choć dotyczące jedynie dni bezopadowych – wskazują, jak duża i zmienna w czasie może być wielkość błędów mierzonych za pomocą strumieniomierzy wartości gęstości strumienia ciepła w glebie. Rozpatrywanie błędów odnoszących się do dwóch rodzajów danych, tj. maksymalnych w ciągu dnia wartości średnich godzinowych strumienia oraz sum dodatnich wartości strumienia ciepła podczas dnia (ilości ciepła wnikaającego do gleby), jeszcze zwiększa wiarygodność otrzymanych wyników.

Za podstawowy sposób dokonywania weryfikacji danych ze strumieniomierzy przyjęto wyznaczanie równań regresji liniowej, opisujących związek tychże danych z otrzymanymi metodą pośrednią (kombinowaną) dla każdego z osobna dnia. W razie konieczności uzupełnienia niewielkich luk w serii pomiarowej (przy braku danych z metody porównawczej) lub gdy zachodzi potrzeba wydłużenia ciągu danych w obrębie poszczególnych okresów bezopadowych, możliwe do zastosowania, a rozważane w pracy sposoby pozwalają



jące na rozwiązanie problemu korygowania danych ze strumieniomierzy to: przyjęcie równania z jednego dnia za reprezentatywne dla innych niezbyt odległych w czasie dni; wyznaczenie (dla określonego okresu bezopadowego) jednego równania na podstawie zbioru danych z kilku dni, wyznaczenie równania na podstawie danych z wszystkich dni, podczas których prowadzono pomiary porównawcze (w trakcie sezonu). Wnioski dotyczące ich przydatności, wysunięte na podstawie analizy wielkości błędów względnych danych ze strumieniomierzy wobec skorygowanych za pomocą takich równań, są następujące:

1. Stosowanie do korygowania danych ze strumieniomierzy w ciągu długiego (np. kilkumiesięcznego) okresu jednego tylko równania, wyznaczonego na podstawie zbioru danych z dużej nawet liczby dni, jest nieracjonalne. Zacierane są wówczas różnice błędów pomiaru strumieniomierzami, wynikające ze zmian wilgotności gleby, a także innych przyczyn. Wielkość błędu – praktycznie ujednostajniona dla wszystkich dni – stanowi jedynie ogólną w tym względzie wskazówkę. Świadczy zarazem o dostosowaniu przyrządu do przeciętnych warunków glebowych (i atmosferycznych) w miejscu i w czasie prowadzenia pomiarów.
2. Korzystanie z równania wyznaczonego dla jednego dnia przy korygowaniu danych z innych dni daje w miarę poprawne wyniki tylko wtedy, gdy stan fizyczny gleby oraz

warunki pogodowe podczas branych pod uwagę dni są zbliżone. Poza tym na poprawność korekty może mieć wpływ mniej lub bardziej trafny wybór dnia uznanego za reprezentatywny dla innych.

3. Sposób dokonywania korekty danych ze strumieniomierzy za pomocą równania otrzymanego na podstawie zbioru danych z kilku dni też należy ocenić pozytywnie, pod warunkiem, że dni te nie są zbyt odległe od siebie oraz nie wystąpiły w tym czasie opady atmosferyczne. Z uwagi na jednolite (dla różnych dni) współczynniki korekcyjne spodziewać się jednak trzeba pewnej rozbieżności między otrzymanym a rzeczywistym błędem pomiaru strumieniomierzami w poszczególnych dniach – tym większej, im bardziej rozciągnięty w czasie jest okres między pierwszym a ostatnim z rozpatrywanych dni.

## Literatura

- HANKS R.J., JACOBS H.S. 1971: Comparison of the calorimetric and flux meter measurements of soil heat flow. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 671–674.
- KOSSOWSKI J. 2005: Problemy metodyczne pomiaru strumienia ciepła w glebie: weryfikacja danych względem uzyskanych inną metodą. *Przeł. Nauk. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* XIV, 2(32): 60–71.
- PHILIP J.R. 1961: The theory of heat flux meters. *J. Geophys. Res.* 66: 571–579.
- PORTMAN D.J. 1958: Conductivity and length relationships in heat-flow transducer performance. *Trans. Am. Geophys. Union* 39: 1089–1094.

## Summary

**Methodical problems concerning soil heat flux measurement: verification of the data in respect to obtained by other method in the multiday-series of measures.** The linear regression equations describing relation of soil heat flux density values in daily course derived from the indirect (combined) method and flux-plates were used for correction of heat flux plate data on a given day. In the case the gaps occur in comparative materials (i.e. from indirect method), the correction problem of heat flux plate data in the multiday series of measures may be solved in the following way: applying the equation from one day (recognised as representative) for other days; by determination of the correction equation on the basis of the data comprised of a few days together, or a set of data from a great number of days during the measurement season. All these conceptions of performance correction of heat flux plate data

were examined regarding their usefulness (exactly, the error magnitude obtained using these equations), but only in respect to days and periods without precipitation. It was stated that applying one equation for correction of heat flux plate data in the course of a long (e.g. several months) period is unreasonable (improper). However, the correction using the equation from one day for the other days, as well as the equation obtained from a few days give correct results on condition that the days taken into consideration are not too distant and precipitation is not recorded at this time (the soil physical properties did not undergo any significant changes).

### Author's address:

Jan Kossowski  
Instytut Agrofizyki PAN  
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin  
Poland