

**Paweł LICZNAR**

Instytut Budownictwa i Architektury Krajobrazu, Akademia Rolnicza we Wrocławiu  
Institute of Building and Landscape Architecture, Agriculture University of Wrocław

## **Polowe pomiary energii kinetycznej deszczów przy użyciu impaktometru elektronicznego**

### **Rainfall kinetic energy field measurements by means of electronic impactometer**

**Słowa kluczowe:** energia kinetyczna deszczów, impaktometr, natężenie deszczu

**Key words:** rainfall kinetic energy, impactometer, rainfall intensity

#### **Wprowadzenie**

Dotychczas w Polsce nie prowadzono pomiarów strumienia energii kinetycznej deszczów. Standardowe obserwacje deszczów w kraju ograniczają się zasadniczo do pomiarów ich sum dobowych przy użyciu klasycznych deszczomierzy Hellmana oraz natężenia opadów za pomocą pluwiografów. Wyniki tych pomiarów są coraz częściej niewystarczające dla nowoczesnego rolnictwa. Z doniesień literatury zagranicznej wynika, że do modelowania i opisu wielu skomplikowanych procesów środowiskowych potrzebne jest posiadanie wiarygodnych obserwacji strumienia energii kinetycznej (oprócz natężenia opadu). Najlepszym tego przykładem mogą być szczegółowe badania i mo-

delowanie erozji wodnej gleb (Licznar 2003), co będzie przedmiotem szerszej dyskusji w artykule. Energia kinetyczna deszczów jest uznawana ponadto za kluczową dla poznania procesu rozprzestrzeniania się patogenów roślinnych (Madden i in. 1998) oraz zdolności infiltracyjnych gleb nawadnianych (Mamedov i in. 2000). Ponadto ciekawym zagadnieniem dla agrometeorologii, a także hydrologii może być obserwacja tempa topnienia pokrywy śnieżnej w okresie wiosennym, które często przyspieszają opady deszczu. Szczegółowa analiza topnienia śniegu wskazuje, że o jego dynamice decyduje w pierwszej kolejności energia kinetyczna spadających kropeł, rozbijających i rozdrabniających skonsolidowaną warstwę śniegu, a nie ciepło spadającej wody lub też natężenie opadu (Licznar i in. 2005a).

Podstawowym celem pracy jest prezentacja wyników ciągłych pomiarów strumienia energii kinetycznej deszczów. Pomiary te były wykonane na terenie miasta Wrocławia w 2004 roku

przy wykorzystaniu prototypowego impaktometru elektronicznego, opracowanego w Instytucie Budownictwa i Architektury Krajobrazu AR Wrocław. Ponadto dokonano porównania wyników bezpośrednich pomiarów strumienia energii kinetycznej deszczów z ich szacunkami na bazie znajomości wartości natężenia opadów, według oryginalnej metodyki uniwersalnego równania strat glebowych USLE (Wischmeier i Smith 1965, 1978).

## Material i metody

W pracy prezentowane są wybrane wyniki obserwacji strumienia energii kinetycznej deszczów, prowadzonych na terenie miasta Wrocławia w 2004 roku, przy wykorzystaniu opracowanego w Instytucie Budownictwa i Architektury Krajobrazu AR Wrocław impaktometru. Przyrząd ten zbudowano na bazie czujnika piezoelektrycznego. Kwartcowy czujnik piezoelektryczny firmy PCB Piezotronics, model 208C01, był podłączony do wbudowanego w przyrząd 8-bitowego mikroprocesora firmy ATMEL, model AT89C51. Rolą mikroprocesora było przetwarzanie sygnałów dopływających z czujnika oraz sterowanie jego pracą. Operacja przetwarzania danych polegała głównie na całkowaniu sygnału generowanego w czujniku po uderzeniu kropli deszczu w ściśle określonym czasie. Szczegółowe dane, dotyczące konstrukcji impaktometru oraz jego funkcjonowania, są przedstawione w pracy Licznara i innych (2005a). W pamięci komputera PC rejestrowany był za pomocą specjalnej analogowo-cyfrowej karty pomiarowej sygnał z impaktometru, odpowiadający strumieniowi energii

kinetycznej deszczu, na powierzchnię czułą przyrządu wynoszącą  $14\,957\text{ mm}^2$  w czasie poszczególnych cykli rejestracji długości 1 sekundy. Po pomiarach sygnał ten był przeliczany na energię kinetyczną przypadającą na  $1\text{ m}^2$  i sumowany dla okresów 30-sekundowych w celu porównania z pomiarami natężenia deszczów.

Równoległe z pomiarami energii kinetycznej deszczów rejestrowane były ich natężenia przy wykorzystaniu w początkowym okresie klasycznego pluwiografu pływakowego, a następnie za pomocą specjalnie skonstruowanego pluwiointensometru wagowego. Konstrukcja pluwiointensometru wagowego oraz jego funkcjonowanie zostały szczegółowo przedstawione w pracach Licznara i innych (2005a, b). Wymienione przyrządy – impaktometr oraz pluwiointensometr wagowy, stanowią podstawowe sondy Zintegrowanego Systemu Pomiarów Opadów Atmosferycznych (ZSPOA) zaproponowanego przez Licznara i innych (2005c) na potrzeby badań nad erozją wodną gleb. Elektroniczny pluwiointensometr wagowy był połączony przez złącze RS232 z drugim komputerem PC, który sterował jego pracą i służył rejestracji wyników. Wartości natężenia chwilowego deszczów były rejestrowane dla 30-sekundowych przedziałów czasu.

Zapisy otrzymane z elektronicznego pluwiointensometru wagowego wykorzystywano do obliczenia wartości strumienia energii kinetycznej deszczu, według zależności podanej oryginalnie przez Wischmeiera i Smitha (1965, 1978), która wyrażona w jednostkach SI ma następującą formę:

$$E_i = (206 + 87\log_{10}I_i)P_i \quad (1)$$

gdzie:

$E_i$  – energia kinetyczna deszczu w przedziale  $i$  [ $J \cdot m^{-2}$ ],

$I_i$  – natężenie deszczu w przedziale  $i$  [ $cm \cdot h^{-1}$ ],

$P_i$  – warstwa deszczu w przedziale  $i$  [cm].

Równanie powyższe jest stosowane powszechnie dla określania wielkości erozyjności deszczów w metodzie USLE. Pozwala ono na obliczenie lokalnych wartości wskaźnika erozyjności deszczów ( $R$ ) na podstawie analizy wieloletnich zapisów pluwiograficznych. Formuła ta została przyjęta z oryginalnych wytycznych amerykańskich Wischmeiera i Smitha (1965, 1978) i wraz z definicją deszczu erozyjnego zastosowana w pionierskich próbach modelowania erozji wodnej gleb przy użyciu równania USLE w Polsce (Banasik i in. 1995). Dotychczasowe rozpoznanie zmienności wskaźnika  $R$  dla wybranych stacji meteorologicznych na terenie kraju zostało przeprowadzone na bazie

omawianej zależności (Banasik i Górski 1992, Banasik i in. 2001, Licznar 2003).

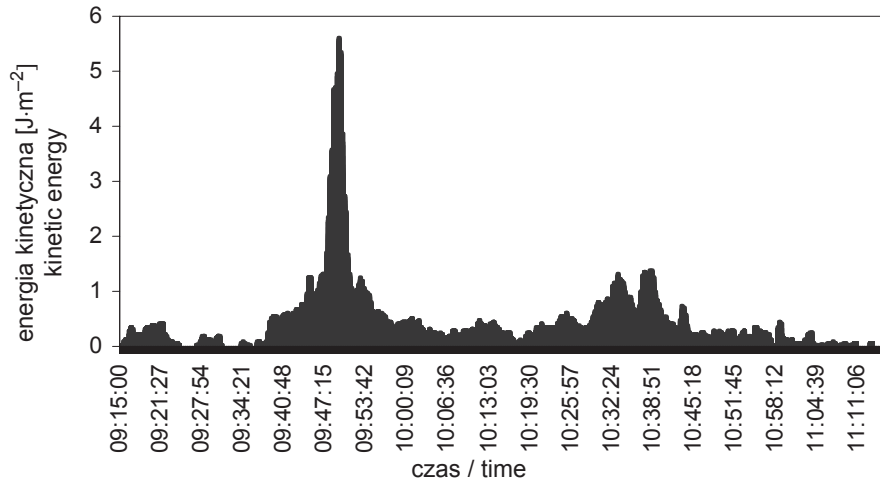
## Wyniki i dyskusja

W trakcie pomiarów polowych energii kinetycznej deszczów obserwowano dużą zmienność tego parametru zarówno pomiędzy poszczególnymi opadami, jak i w czasie ich trwania. Podstawowe parametry charakteryzujące zmiany natężenia opadów zarejestrowane przy użyciu deszczomierza oraz zmiany wartości ich strumienia energii kinetycznej, pomierzone przy użyciu impaktometru, zostały zestawione dla wybranych zdarzeń opadowych z 2004 roku w tabeli 1. Uzupełnieniem tabeli 1 są wartości całkowitej energii kinetycznej dla zarejestrowanych deszczów, wynikające z formuły Wischmeiera i Smitha (1965, 1978) według wzoru (1). Dla szczególnej ilustracji zmienności czasowej strumienia energii kinetycznej na rysunku 1 przedstawiono wyniki przykładowej rejestracji z impaktometru elektronicznego

TABELA 1. Podstawowe parametry natężenia deszczu i strumienia energii kinetycznej dla wybranych zdarzeń opadowych 2004 roku

TABLE 1. Basic rainrate and kinetic energy flux parameters for selected precipitation events of 2004

Data Date	Warstwa opadu [mm] Precipitation depth	Natężenie deszczu [mm·h <sup>-1</sup> ] Rainrate		Chwilowy strumień energii kinetycznej [J·m <sup>-2</sup> ·(30 s) <sup>-1</sup> ] Temporal kinetic energy flux		Energia kinetyczna zdarzenia [J·m <sup>-2</sup> ] Event kinetic energy	
		maksymal- ne maximal	średnie average	maksymal- ny maximal	średni average	pomierzona measured	obliczona calculated
8.07	8,27	32,4	9,3	3,3	1,0	106,4	171,0
9.07	10,22	67,2	5,4	5,5	0,4	98,8	199,9
20.07	1,74	28,8	8,4	3,4	1,4	34,0	35,2
21.07	6,37	124,8	45,0	8,7	3,6	62,0	164,0
22.07	7,87	22,8	7,3	2,0	0,7	92,8	158,8
14.08	3,81	15,6	5,6	1,9	0,5	39,9	65,4
30.08	1,71	10,8	0,9	1,0	0,1	14,8	1,71

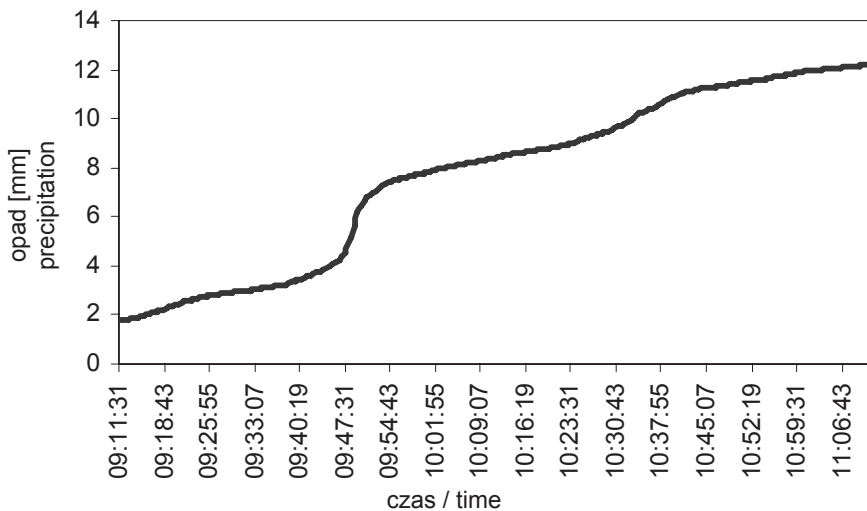


RYSUNEK 1. Zmiany wartości strumienia energii kinetycznej deszczu dla opadu z 09.07.2004 roku zarejestrowane za pomocą impaktometru  
 FIGURE 1. Rainfall kinetic energy flux changes for the storm on 09.07.2004 registered by the impactometer

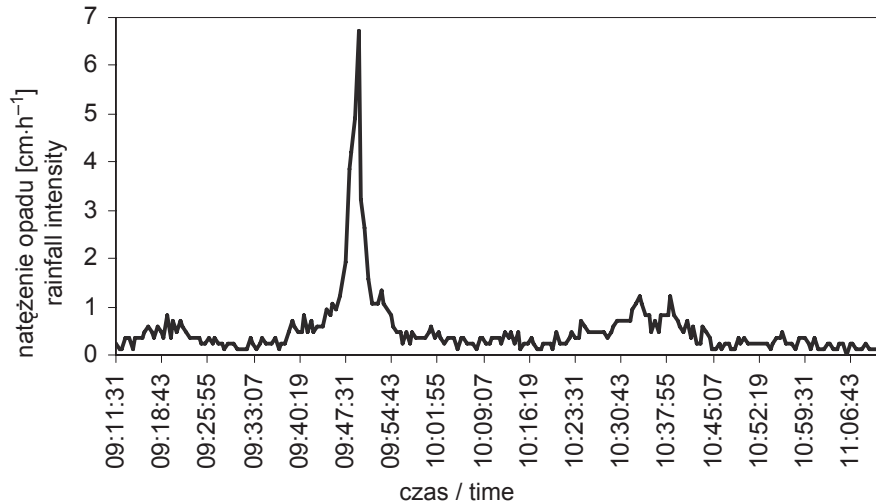
dla opadu burzowego z dnia 9.07.2004 roku w godzinach od 9.11 do 11.12. Rejestracja tego samego opadu otrzymana z elektronicznego pluwiointensometru wagowego jest widoczna na rysunku 2. Zmiany warstwy deszczu zostały prze-

liczone na odpowiadające im chwilowe natężenia opadu dla poszczególnych okresów 30-sekundowych (rys. 3).

Istotne jest wzajemne porównanie rysunków 1 i 3. W wyniku porównania można zauważyć, że kształt krzywych



RYSUNEK 2. Zarejestrowany przez pluwiointensometr przyrost warstwy opadu burzowego z 09.07.2004 roku  
 FIGURE 2. Registered by the pluviointensimeter storm water depth rise on 09.07.2004

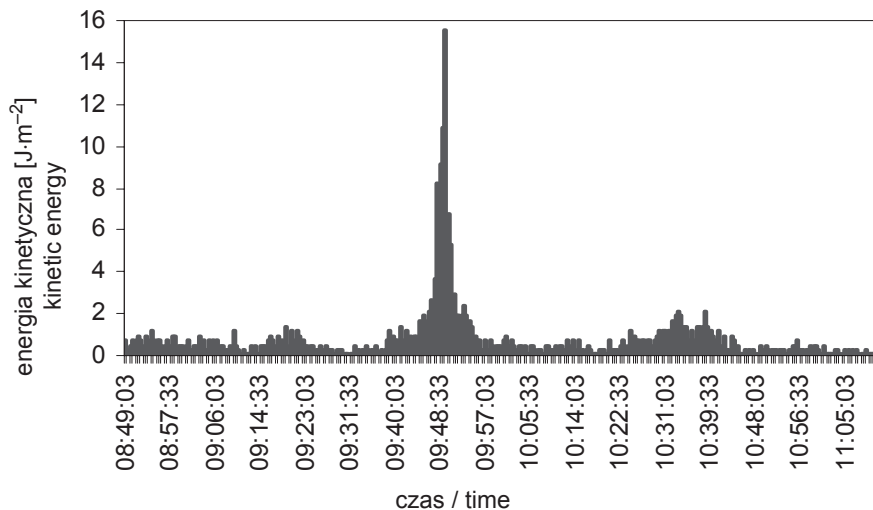


RYSUNEK 3. Chwilowe zmiany natężenia deszczu z 09.07.2004 roku  
 FIGURE 3. Temporal rainfall intensity changes for the storm on 09.07.2004

na wykresach jest bardzo zbliżony. Tego typu analogię w charakterze rejestracji zarówno natężenia opadu, jak i jego energii kinetycznej obserwowano także dla innych opadów. Pozostaje to w zgodzie z obserwacjami eksperymentalnymi innych autorów (Battista i in. 1994), jak również z samą teorią zjawiska (Pruppacher i Klett 2000). Zarówno natężenie opadu, jak i jego energia kinetyczna są wielkościami zależnymi od średnicy kropeł deszczu, a więc ściśle powiązane ze sobą. Strumień energii kinetycznej deszczu jest uznawany za moment statystyczny 5. rzędu rozkładu kropeł deszczów (ang. DSD – Drop Size Distributions), natomiast natężenie opadu za moment rzędu około 3,7 (Krajewski i in. 2006). Istnienie ścisłej zależności między natężeniem opadu a jego energią dało także podstawę do sformułowania wspomnianego już uprzednio wzoru, stosowanego przy obliczaniu wskaźnika  $R$ .

Wartości chwilowe natężenia opadu z dnia 9.07.2004 roku zostały przeliczone

na odpowiadające im wielkości strumienia energii kinetycznej, zgodnie z cytowaną już formułą metody USLE. Obliczone w ten sposób wartości energii kinetycznej są przedstawione na rysunku 4. Porównanie wykresów na rysunkach 1 i 4 wskazuje na podobieństwo jedynie przebiegu krzywych. Wartości energii kinetycznej obserwowane i szacowane na podstawie pomiaru natężenia były różne. Różnice te były obserwowane także dla innych zarejestrowanych opadów. Jak widać wyraźnie na rysunku 4, szacowanie wartości strumienia energii kinetycznej deszczu na bazie rejestracji natężenia opadu prowadzi do przeszacowania jego rzeczywistych wartości. Szczególnie wysokie przeszacowanie dotyczy okresów o wysokich natężeniach opadu. Widoczna na rysunku 3 kulminacja natężenia deszczu (około godz. 9.50) o wartości dochodzącej do blisko  $7 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$  przekłada się na rysunku 4 na maksymalną wartość strumienia energii kinetycznej, sięgającą niemal  $16 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ , podczas gdy zarejestrowana



RYSUNEK 4. Szacowane wartości strumienia energii kinetycznej deszczu z 09.07.2004 roku wyznaczone na podstawie rejestracji pluwiograficznych  
 FIGURE 4. Predicted rainfall kinetic energy flux values for the storm on 09.07.2004 calculated on the base of pluviograph data

przez impaktometr wartość strumienia energii była niemal 3-krotnie mniejsza i wynosiła około  $5,6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$  (rys. 1). Znacznie mniejszej skali przeszacowanie obserwowane było dla okresów o mniejszych wartościach natężenia opadu. Przykładowo na rysunku 4 wyznaczony strumień energii kinetycznej dla okresu od godziny 10.30 do 10.40, kiedy to opad miał natężenie oscylujące około  $1 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ , mieścił się w zakresie od około 1 do  $2 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ . W tym samym czasie zarejestrowany przez impaktometr strumień energii kinetycznej był tylko nieznacznie mniejszy i mieścił się w zakresie od około 0,5 do  $1,5 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Opisywane niezgodności pomiędzy rzeczywistymi i szacowanymi wartościami energii kinetycznej deszczów skłaniają do sformułowania hipotezy badawczej, iż mogą one wynikać z odmiennej specyfiki opadów w Polsce w porównaniu z opadami w USA. Należy pamiętać,

że wzór dla obliczania energii kinetycznej w oryginalnej metodzie USLE ma charakter w znacznej mierze empiryczny i lokalny. Opiera się on bowiem przede wszystkim na sformułowanej przez Lwisa i Parsonsa (1943) empirycznej zależności pomiędzy średnicą przeciętną kropli deszczu ( $d_{50}$ ) i natężeniem opadu ( $i$ ):

$$d_{50} = 0,01932i^{0,182} \quad (2)$$

Powyższa zależność empiryczna opracowana dla warunków Ameryki Północnej niekoniecznie musi być odpowiednia w warunkach Polski, gdzie zjawiska opadowe mają często całkowicie odmienną genezę, charakter oraz natężenie. Pośrednim potwierdzeniem tej tezy może być fakt, że w wielu krajach zostały opracowane zastępcze zależności funkcyjne do szacowania energii kinetycznej na podstawie rejestrowanego natężenia opadu. Szczegółowy przegląd

tych zależności można znaleźć w pracy Sallesa i innych (2002). W świetle opisanych wyników obserwacji przeprowadzonych na terenie Wrocławia także w warunkach polskich w toku dalszego upowszechniania modelu USLE dla modelowania strat glebowych, istnieje potrzeba korekcji oryginalnej zależności na energię kinetyczną podanej przez Wischmeiera i Smitha (1978).

## Wnioski

Przeprowadzone w 2004 roku na terenie miasta Wrocławia polowe pomiary energii kinetycznej deszczów przy użyciu skonstruowanego impaktometru elektronicznego, połączone z rejestracją ich natężenia za pomocą elektronicznego pluwiointensometru wagowego, pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków wstępnych:

1. Strumień energii kinetycznej deszczów jest parametrem silnie zróżnicowanym zarówno pomiędzy poszczególnymi opadami, jak i w obrębie pojedynczych deszczów. Niemniej silnie zróżnicowany w czasie przebieg rejestrowanych wartości strumienia energii kinetycznej ma kształt generalnie zbliżony do kształtu rejestrowanych zmian chwilowego natężenia opadu.
2. Wartości strumienia energii kinetycznej deszczów szacowane na podstawie znajomości natężenia opadu, według oryginalnej metody obliczania wskaźnika  $R$  w równaniu USLE, są zwykle zawyżone w stosunku do rzeczywistych ich wartości, mierzonych impaktometrem elektronicznym. Szacunki energii kinetycznej

według metody ULSE są szczególnie zawyżone dla dużych wartości chwilowych natężenia opadu.

3. Zachodzi dalsza potrzeba kontynuacji polowych obserwacji strumienia energii kinetycznej deszczów na terenie Polski, jak również opracowania w przyszłości, na podstawie ich wyników, specyficznej krajowej zależności dla szacowania energii kinetycznej w funkcji natężenia opadu.

## Literatura

- BANASIK K., GÓRSKI D. 1992: Ocena erozyjności deszczy dla trzech wybranych stacji Polski Południowo-Wschodniej. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Melioracje XL*, 211: 39–50.
- BANASIK K., SKIBIŃSKI J., GÓRSKI D. 1995: Metody oceny erozji powierzchniowej i akumulacji rumowiska w zbiornikach [w:] *Metodyka zagospodarowania zasobów wodnych w małych zlewniach rzecznych*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa: 63–76.
- BANASIK K., GÓRSKI D., MITCHELL J.K. 2001: Rainfall erosivity for east and central Poland. *Proc. Inter. Symp. & Exhibit. on Soil Erosion Res. 21st Century*, January 3-5, Honolulu, Hawaje, USA: 279–282.
- BATTISTA P., BENINCASA F., MATERASSI A. 1994: Progetto e realizzazione di un impattometro a microprocessore. *Ing. Agraria XXV*, 1: 27–33.
- KRAJEWSKI W.F., KRUGER A., CARACCIOLO C., GOLÉ P., BARTHES L., CREUTIN J-D, DELAHAYE J-Y., NIKOLOPOULOS E.I., OGDEN F., VINSON J-P. 2006: DEVEX-disdrometer evaluation experiment: Basis results and implications for hydrologic studies. *Adv. in Water Res.* 29: 311–325.
- LAWS J., PARSONS D. 1943: The relation of raindrop size to intensity. *Trans. Am. Geophys. Union* 24: 452–460.
- LICZNAR P. 2003: Modelowanie erozji wodnej gleb. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Monografie XXXII*, 456.



- LICZNAK P., ŁOMOTOWSKI J., ROJEK M. 2005a: Pomiary i przetwarzanie danych opadowych dla potrzeb projektowania i eksploatacji systemów odwodnieniowych. Futura PZLiTS, Poznań.
- LICZNAK P., ŁOMOTOWSKI J., ROJEK M. 2005b: Sposoby pomiaru natężenia deszczu na potrzeby projektowania i eksploatacji systemów odwodnienia terenów zurbanizowanych. *Woda-Środ.-Obsz. Wiejs.* 5, (14): 209–219.
- LICZNAK P., ŁOMOTOWSKI J., ROJEK M. 2005c: Zintegrowany System Pomiarów Opadów Atmosferycznych dla potrzeb badań nad erozją wodną. *Acta Agroph.* 5(2): 335–344.
- MADDEN L.V., WILSON L.L., NTAHIMPERA N. 1998: Calibration and evaluation of an electronic sensor for rainfall kinetic energy. *Phytopath.* 88(9): 950–959.
- MAMEDOV A.I., SHAINBERG I., LEVY G.J. 2000: Irrigation with effluent water: effects of rainfall energy on soil infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 732–737.
- PRUPPACHER H.R., KLETT J.D. 2000: Microphysics of clouds and precipitation. Second revised and enlarged edition. Kluwer Academic Publishers, New York.
- SALLES C., POESEN J., SEMPER-TORRES D. 2002: Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity. *J. Hydrology* 257: 256–270.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. 1965: Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Guide for selection of practices for soil and water conservation. Agricultural Handbook 282, ARS, Washington.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. 1978: Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Agricultural Handbook 537, ARS, Washington.

## Summary

**Rainfall kinetic energy field measurements by means of electronic impactometer.** Results of the rainfall kinetic energy flux measurements conducted during 2004 in Wrocław are presented at the paper. Kinetic energy measurements were made with the use of electronic impactometer and associated with rainfall intensity registrations. Measured rainfalls kinetic energy flux values were found to have similar shapes of temporal changes, as their intensity values. Estimates of rainfalls kinetic energy values based on their intensity and original energy relationship of USLE model were bigger than measured values, especially for high precipitation intensities.

### Author's address:

Paweł Licznar  
Akademia Rolnicza we Wrocławiu  
Instytut Budownictwa i Architektury Krajobrazu  
pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław  
Poland