

Ewa Smolska

Wydział Geografii i Studiów Regionalnych
Uniwersytet Warszawski
e-mail: e.smolska@uw.edu.pl

**SPLYW WODY I EROZJA GLEBY NA PIASZCZYSTYM STOKU
W OBSZARZE MŁODOGLACJALNYM – POMIARY POLETKOWE
(POJEZIERZE SUWAŁSKIE, POLSKA NE)**

**Runoff and soil erosion on sandy slope in the last-glacial area
– plots measurements (Suwałki Lakeland, NE Poland)**

Abstract: The aim of the study performed in years 2007-2009 in the Suwałki Lakeland was assessed the intensity of soil erosion and runoff on a sandy slope under different cultivation. The study also focused on analysis of selected factors affecting the erosion (intensity of rainfalls, erosion susceptibility of soil, vegetation cover). Measurements were performed on the standard USLE plots inclined 8°. The mean annual erosion amounted to 0,2 t ha⁻¹ under cereals (rye and oat), 2,1 t ha⁻¹ under potatoes planted in rows parallel to the slope gradient, and 2,75 t ha⁻¹ on the black fallow. Experimentally determined index of erosion susceptibility K was 0,0041. The mean annual value of the canopy factor C was 0,064 for cereals and 0,8 for potatoes. Short rainfall events of 20-30 mm and erosivity 100-200 MJ mm ha⁻¹h⁻¹ are characteristic for the study area. The results obtained for the sandy slope support previous findings that such short-term events play a significant role in soil erosion. Effectivity of such events strongly depends on the vegetation cover as they are responsible for 25-30% of soil loss under potatoes and 45-50% under cereals.

Słowa kluczowe: erozja gleby, spływ powierzchniowy, poletka, erozyjność opadów, gleba piaszczysta, Polska NE

Key words: soil erosion, runoff, plots, rainfall erosivity, sandy soil, NE Poland

WSTĘP

Obszar ostatniego zlodowacenia o urozmaiconej pagórkowatej rzeźbie zaliczany jest do średnio i słabo zagrożonego erozją wodną gleby (Józefa-

ciuk 1991, Józefaciuk, Józefaciuk 1995). W badaniach prowadzonych na Pojezierzach Pomorskim i Mazurskim wskazywano na wzmożoną erozję gleby głównie ze względu na znaczne nachylenia stoków (Niewiadomski 1964, 1968, Niewiadomski, Skrodzki 1964, Chudecki, Niedźwiecki 1983). Podkreślano także znaczenie krótkotrwałych lecz o dużym natężeniu opadów deszczu, powodujących okresowo intensywną erozję zarówno rozproszoną jak i żłobinową. Za H. Uggłą i in. (1962, 1968) określano ją jako „erozję burzową”. Wskazywano na gleby piaszczyste (piaski luźne i piaski słabogliniaste) o dobrej przepuszczalności, jako szczególnie podatne na działanie takich opadów (Uggła i in. 1998). Prowadzone pomiary metodami niepoletkowymi pozwoliły na oszacowanie erozji na kilka-kilkanaście ton ha^{-1} rocznie, z maksymalnymi wielkościami sięgającymi około 50 t ha^{-1} na Mazurach (Niewiadomski, Skrodzki 1964) i ponad 30 t ha^{-1} na Suwalszczyźnie (Smolska 2007). W dotychczasowych badaniach prowadzonych w tym regionie brak jest analizy relacji między opadem, spływem i erozją gleby. Analiza tych relacji jest szczególnie istotna w ocenie zagrożenia wodną erozją gleby (Bryan 2000, Boardman 2006).

Celem badań prowadzonych w latach 2007-2009 na Pojezierzu Suwalskim było określenie wielkości erozji wodnej i spływu powierzchniowego na stoku piaszczystym z uwzględnieniem różnego użytkowania oraz analiza wybranych czynników wpływających na erozję jak: natężenie opadów, podatność gleby na erozję, okrywa roślinna.

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU I METODY BADAŃ

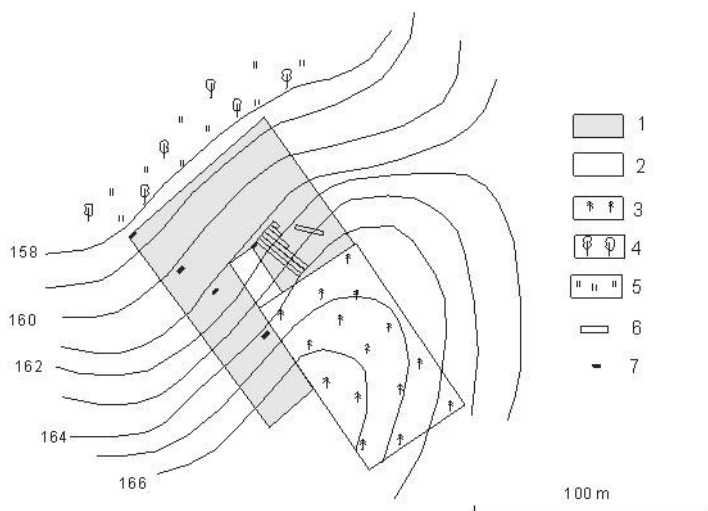
Pomiary erozji metodą poletkową prowadzono na Pojezierzu Suwalskim w okolicy wsi Udziejek ($54^{\circ}15'16,0''\text{N}$, $22^{\circ}53'00,63''\text{E}$), położonej 20 km na północ od Suwałk. Poletka usytuowano na piaszczystym stoku o wystawie NW i nachyleniu 8° , z glebą bielicową. W górnej części gleba jest zerodowana, natomiast w dolnej – poziom orno-próchniczny ma 40 cm miąższości. Skład mechaniczny gleby ukazuje tabela 1. Zawartość materii organicznej w poziomie ornym określona metodą strat po prażeniu wynosi 1,53%.

Tabela 1. Skład granulometryczny gleby

Table 1. Soil texture

Stok – Slope	Zawartość frakcji – Content of fraction [%]							
	>2	2,0-1,0	1,0-0,1	0,1-0,05	0,05-0,02	0,02-0,005	0,005-0,002	<0,002
Górna część <i>Upper part</i>	3	3	83	8	2	1	0	0
Dolna część <i>Lower part</i>	2	3	76	11	4	2	1	1

W środkowej części stoku założono 6 poletek o szerokości 2 m. Trzy z nich miały długość 22,1 m, kolejne trzy miały zróżnicowaną długość: 11, 5,5 i 2,75 m. Dodatkowo, na tym samym stoku, w jego górnej części o nachyleniu 10°, założono w celu porównania jedno poletko o długości 11 m. Położenie poletek przedstawia rysunek 1. Wszystkie poletka zostały wydzielone za pomocą ogrodniczej folii PCV o wysokości 20 cm, którą wkopano na głębokość 10 cm. Poletka wyposażono w instalacje zbiorcze spływu powierzchniowego i zmywanej gleby. Składały się one z półrynien i systemu rur odprowadzających oraz pojemników, które zbierały spływającą wodę wraz z osadem. Układ poletek ukazuje fotografia 1, system urządzeń zbierających – fotografia 2. W niniejszym opracowaniu analizą objęto standardowe poletka USLE (o długości 22,1 m) oraz poletka o długości 11 m.



Rys. 1. Lokalizacja poletek na stoku w okolicy Udziejka: 1 – grunty orne, 2 – łąka, 3 – młodziak sosnowy, 4 – ols, 5 – łąka, 6 – poletka pomiarowe spływu i splukiwania, 7 – chwytacze

Fig. 1. Location of measurement stands near Udziejek: 1 – arable land, 2 – meadow, 3 – young pine forest, 4 – alder forest, 5 – meadow, 6 – runoff plots, 7 – runoff collectors

W okresie badań jedno z poletek o długości 22,1 m utrzymywano w czarnym ugorze (bez roślinności), na dwóch pozostałych poletkach uprawiano na zmianę zboże i ziemniaki. W 2007 i 2009 roku były to zboża jare: mieszanka owsa z jęczmieniem i owies, w 2008 roku – żyto ozime. Prace polowe wykonywano w tych samych terminach, jak na okolicznych polach: wysiew zbóż jarych odbywał się w pierwszym tygodniu kwietnia, ziemniaki sadzono między 5 i 9 maja. Zbiór żyta obył się 30 lipca 2008, natomiast zbóż jarych w sierpniu (10.08.2007 i 26.08.2009).



Fot. 1. Lokalizacja poletek na stoku w Udziejku
Photo 1. Location of runoff plots on slope near Udziejek



Fot. 2. Urządzenie zbierające spływ i erodowaną glebę
Photo 2. Collector at runoff plot

W sezonie opadowym urządzenia zbierające były opróżniane raz w miesiącu oraz w miarę możliwości po pojedynczych zdarzeniach. Mierzono poziom wody w zbiornikach i na tej podstawie określano objętość spływu powierzchniowego. W celu określenia ilości odprowadzonego materiału pobierano próbę z odprowadzonej ze zbiornika wody wraz z drobną zawiesiną, a osad piaszczysty pozostający na dnie zbiornika wybierano osobno. W przypadku małej objętości wody ($< 5 \text{ dm}^3$) i osadu pobierano cały materiał wraz z wodą. Masę materiału glebowego obliczano uwzględniając osad z dna zbiornika oraz obliczony na podstawie koncentracji stałej frakcji w pobranej próbce wody o znanej objętości.

Opady były rejestrowane pluwiografem (z automatyczną rejestracją) zamontowanym w pobliżu poletek. Energię kinetyczną opadów obliczono wg L.C. Browna i G.R. Foster (1987), wyznaczono także czynnik erozyjności opadów EI_{30} (Wischmeier, Smith 1978). Za pojedynczy opad przyjęto zgodnie z USLE taki, który był rozdzielony od następnego czasem dłuższym niż 6 godzin (Wischmeier, Smith 1978).

WYNIKI BADAŃ

Charakterystyka opadów

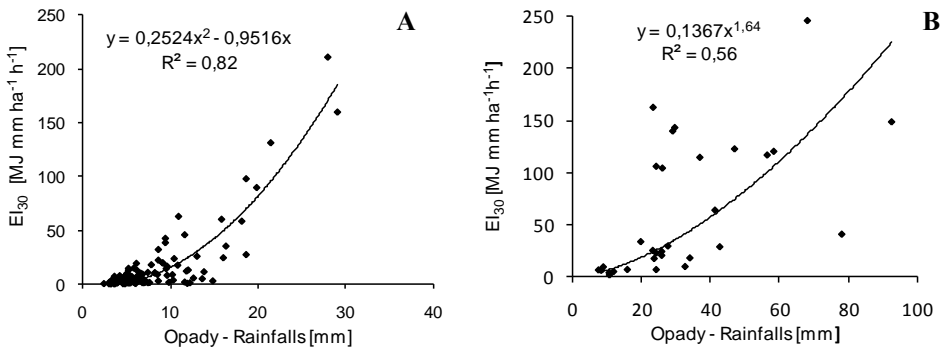
Warunki opadowe w okresie badań nie odbiegały istotnie od wieloletnich. Średnia roczna suma opadów w latach 1987-2006 wyniosła 592,9 mm. Cechą charakterystyczną opadów w obszarze badań, jak i w całym regionie, jest niewielka ich wydajność oraz intensywność. Dla okresu objętego pomiarami w poszczególnych latach opady wyniosły od 452,5 (2008) do 651,2 mm (2007), a wskaźnik erozyjności opadów i spływów (EI_{30}) kształtował się odpowiednio od 557 do 1213 MJ mm ha⁻¹h⁻¹ (tab. 2).

Tabela 2. Opad, spływ powierzchniowy i erozja gleby na standardowym, wg USLE, poletku bez roślinności

Table 2. Precipitation, runoff per unit area and soil erosion on USLE standard plot with bare fallow

Rok Year	Opad Precipitation [mm]		EI_{30} [MJmmha ⁻¹ h ⁻¹]	Spływ – Runoff [mm]		Erozja – Erosion [kg ha ⁻¹]	
	Całkowity Total	Śnieg Snow		Deszcz Rainfall	Roztopy Snowmelt	Deszcz Rainfall	Roztopy Snowmelt
2007	651,2	104,6	1213	5,12	0,16	4936,3	61,1
2008	452,5	143,0	557	1,34	0,17	1154,1	12,0
2009	480,2	86,5	463	2,56	0,92	2085,1	42,4
Średnio rocznie Mean annual	525,0	111,4	804	3,01	0,41	2725,1	38,5

W poszczególnych latach wystąpiło od 5 (2008) do 9 (2007) opadów, których suma przekroczyła 10 mm, natomiast w całym okresie objętym pomiarami wystąpiły 4 opady powyżej 20 mm. Największą erozyjnością cechował się opad deszczu o wydajności 27,9 mm ($EI_{30}=211,4 \text{ MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}$), który wystąpił 5.07.2007 r. Nieco mniejszą erozyjnością cechował się opad z dnia 30.08.2009 r. – 20,3 mm ($EI_{30}=160,7 \text{ MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}$). Opady o znacznej erozyjności ($EI_{30}>50$) występowały zazwyczaj w lipcu, rzadziej w czerwcu, sierpniu, czy wrześniu. Zależność pomiędzy sumą poszczególnych opadów a wskaźnikiem erozyjności opadu jest wyraźna (rys. 2A). Generalnie im większa wydajność opadu, tym większa była jego erozyjność. Taka relacja jest charakterystyczna przede wszystkim dla letnich krótkotrwałych opadów powyżej 15 mm, tzw. burzowych ($EI_{30}>50$). Zazwyczaj opady te cechowały się niewielką średnią intensywnością, kształtującą się w granicach 0,1-0,2 mm min^{-1} , znaczną intensywność opadu notowano jedynie w krótkim czasie najczęściej przez 5 do 15 minut i wynosiła ona 0,5-0,8 mm min^{-1} , sporadycznie przekraczała 1 mm min^{-1} . Natomiast opady do 15 mm wykazują większe zróżnicowanie, są to zarówno krótkie intensywne deszcze ($10 < EI_{30} < 50$), jak i długotrwałe typu rozlewnego, ale o bardzo małej intensywności ($EI_{30} < 10$). Jeśli zostaną uwzględnione sumy opadów dla okresów pomiarowych, często obejmujących kilka opadów, wówczas korelacja ze wskaźnikiem EI_{30} jest wyraźnie słabsza (rys. 2B).



Rys. 2. Zależność pomiędzy sumą opadów i czynnikiem erozyjności deszczów EI_{30} dla pojedynczych opadów $>3\text{mm}$ (A) i okresów pomiarowych (B)

Fig. 2. Relationship between rainfall amount and rainfall erosivity factor EI_{30} for rains $>3\text{mm}$ (A) and measurement periods (B)

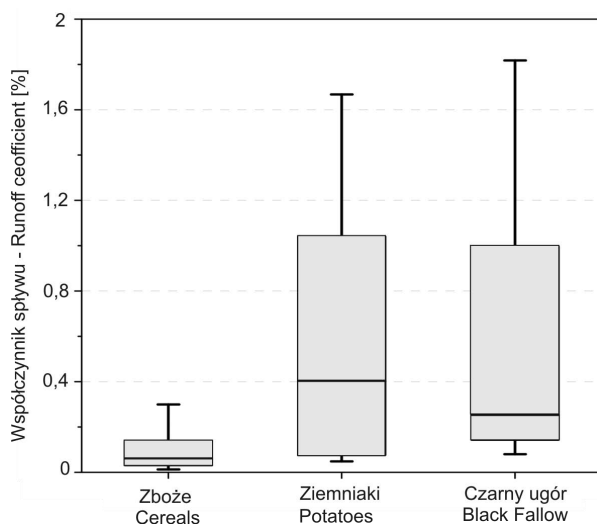
W latach 2007 i 2008 zimy były łagodne i cechowały się małą miąższością pokrywy śnieżnej, której topnienie następowało wielokrotnie w ciągu okresu zimowego na płytko zamrożonym gruncie. Jedynie w roku 2009 pokrywa śnieżna zalegała od stycznia do marca. Jej topnienie również nie miało gwałtownego przebiegu. Topnienie pokrywy śnieżnej na badanym obszarze zazwyczaj nastę-

puje stopniowo w ciągu 10-14 dni, przy ujemnych temperaturach nocą (Stopa-Boryczka, Martyn 1985).

Spływ powierzchniowy

Maksymalna objętość spływu z poletka o długości 22,1 m utrzymanego bez roślinności i z uprawą ziemniaka wynosiła odpowiednio: 70 i 75 dm³, a przeważnie kształtowała się w zakresie kilku dm³, przy krótkich opadach o średniej intensywności – nawet poniżej 0,5 dm³. Taki niewielki spływ powierzchniowy uwarunkowany był głównie dobrą przepuszczalnością piaszczystego gruntu. Zazwyczaj największy spływ występował na poletku bez roślinności; wyniósł on średnio rocznie 3,4 mm. W poszczególnych latach był on znacznie zróżnicowany od 1,5 do 5,3 mm. Niewiele mniejszy spływ notowano na poletku z uprawą ziemniaka (1,4-4,6 mm). Najmniejszy i jednocześnie najmniej zróżnicowany spływ wystąpił z poletka zajętego pod uprawę zboża. Najczęściej nie przekraczał on 1 dm³, zaś maksymalna zmierzona objętość nie przekroczyła 10 dm³. Średni roczny spływ wyniósł zaledwie 0,5 mm, w tym na okres wegetacyjny przypadło 0,3 mm.

Cechą charakterystyczną badanego stoku jest bardzo mały współczynnik spływu (rys. 3). Podczas opadu 5.07.2007 r. o wydajności 27,9 mm i erozyjności $EI_{30}=211,4$ niewiele przekroczył 2% (poletko z czarnym ugiem i ziemniakami), a w przypadku zboża wyniósł zaledwie 0,3%. Większe wartości współczynnika spływu (>3%) wystąpiły podczas 2 opadów: 25.05.2007 r. – 10,9 mm i 30.08.2009 r. – 20,2 mm, podczas których zanotowano najwyższą w okresie badań 10-minutową intensywność, odpowiednio 1,45 mm min⁻¹ i 1,04 mm min⁻¹.



Rys. 3. Współczynnik spływu na poletkach z czarnym ugiem, zbożem i ziemniakami
Fig. 3. Runoff coefficient for plots with black fallow, cereals and potatoes

Po opadach o erozyjności $EI_{30} > 100$ na poletkach bez roślinności można było zaobserwować wyraźne ślady wskazujące na spływ wieloma strugami lub całą powierzchnią (fot. 3 i 4). Po opadzie o największej erozyjności w okresie badań utworzyły się płytkie 1-2 cm koryta roztokowe z odsypami. Szerokość między odsypami wynosiła od kilkunastu cm do około 1 m (fot. 3). W przypadku opadów, podczas których 10-minutowe natężenie przekroczyło 1 mm min^{-1} , spływ zachodził całą powierzchnią poletka ograniczonego bolderami. Na powierzchni gleby pojawiły się na przemian występujące rozmywy i namywy, a po obu brzegach poletka (wzdłuż ograniczających je bolderów) ślady wskazujące na erozyjne rozmycie w wyniku spływu skoncentrowanego (fot. 4). Na poletku z ziemniakami spływ zachodził całą szerokością bruzd, które uległy przede wszystkim poszerzeniu (fot. 5). Udział intensywnych opadów w rocznym spływie z poletka bez roślinności wynosił od 30 do 37%. Podobnie kształtował się ich udział w przypadku ziemniaków, gdzie większe wartości współczynnik spływu przyjmował podczas opadów występujących wiosną. Na poletku ze zbożem znaczące rozmiary spływ osiągał jedynie podczas ulew występujących w maju, tj. we wczesnej fazie wzrostu roślin i wówczas jego udział w rocznej objętości spływu wody wynosił 46%, a współczynnik spływu kształtował się na poziomie 0,5-0,6%. W pełni sezonu wegetacyjnego współczynnik ten był dziesięciokrotnie mniejszy.

Ze względu na łagodne i stosunkowo ciepłe zimy, wiosenny okres roztopowy nie miał większego znaczenia w erozji gleby w 3-letnim okresie badań. Jedynie w 2009 roku pokrywa śnieżna zalegała prawie przez całą zimę (107 dni) i okres roztopowy (częściowe stopienie się zalegającego śniegu) cechował się spływem zbliżonym do występującego podczas letnich ulew. Stanowił on 26% rocznej objętości spływu na poletku bez roślinności, podczas gdy w pozostałych latach: od 3 do 11%.

Dla poszczególnych cykli pomiarowych w okresie wegetacyjnym analizowano zależność pomiędzy spływem powierzchniowym a sumą opadów i ich erozyjnością (EI_{30}) (rys. 4). Wielkość spływu nie wykazuje związku z opadami. Lepsza zależność zaznacza się pomiędzy spływem i erozyjnością opadu, określoną czynnikiem EI_{30} . W przypadku spływów z poletka bez roślin i z ziemniakami regresja liniowa wskazuje na korelację odpowiednio 0,82 i 0,77 na poziomie istotności 0,05. Natomiast dla zboża brak zależności od sumy opadów ($r^2=0,02$), a znacznie słabsza zależność od erozyjności opadów ($r^2=0,51$) wynika z dużego uwarunkowania spływu powierzchniowego rozwojem okrywy roślinnej. Okres pełni wegetacji czy po żniwach (od lipca do września) ma niewielki udział w sezonowej strukturze spływu. Nawet występujące w tym czasie opady o erozyjności ponad 100 jednostek bardzo słabo zaznaczyły się w rocznej objętości spływu.

Porównano również spływ, jaki występował na poletku bez roślinności o długości 11 m i o nachyleniu 8° i 11° . Podczas opadów o erozyjności do 30 jedno-



Fot. 3. Ślady po spływie powierzchniowym (lipiec 2007)

Photo 3. Paths of overland flow (July 2007)



Fot. 4. Ślady po spływie warstwowym widoczne na poletku po opadzie 26 czerwca 2007 r.

Photo 4. Effect of sheet flow on runoff-plots after rain, 26 June 2007

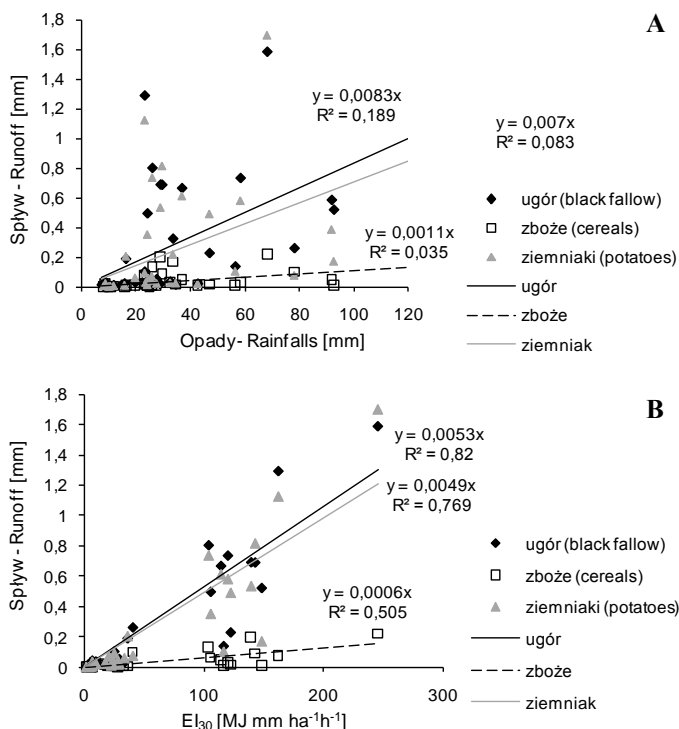
stek, taka różnica w nachyleniu terenu nie miała znaczenia, wielkości spływu były podobne (nieco większe jak i nieco mniejsze). Dopiero przy intensywniejszych opadach poletko o większym nachyleniu generowało wyraźnie większy spływ powierzchniowy (rys. 5).



Fot. 5. Wypełnione bruzdy między rzędami ziemniaków po opadzie 26 czerwca 2007 r.
Photo 5. Filled furrows between potatoes, 26 June 2007

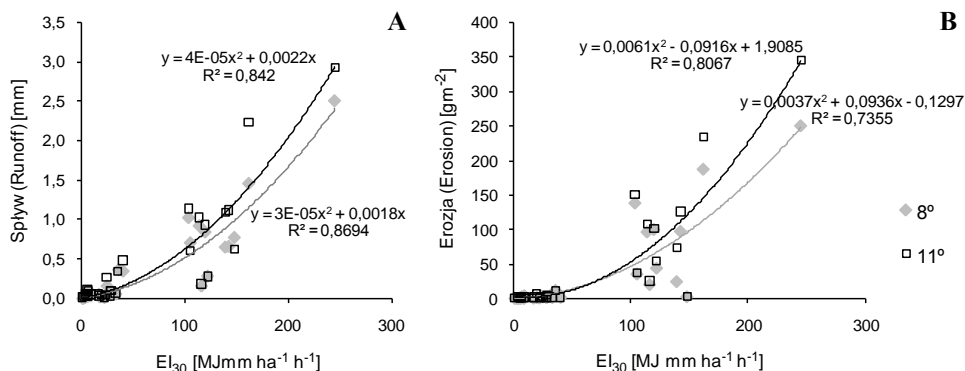
Erozja gleby

Pomiary erozji gleby na poletkach w poszczególnych okresach wskazują przede wszystkim na zależność od użytkowania i cech opadów. Średnia roczna erozja gleby na poletku bez roślinności łącznie z roztopami wyniosła $2,75 \text{ t ha}^{-1}$, nieco mniejsze wartości erozji zanotowano w uprawie ziemniaka – $2,1 \text{ t ha}^{-1}$. Najsilniej erozję ograniczało zboże, średnio rocznie wyniosła $0,2 \text{ t ha}^{-1}$. Spłuki-



Rys. 4. Zależność pomiędzy splywem powierzchniowym i sumą opadów (A) oraz czynnikiem EI_{30} dla poletek o długości 22,1 m

Fig. 4. Relationship between runoff and amount of rainfall (A), and EI_{30} factor (B) for plots 22,1 long



Rys. 5. Zależność pomiędzy czynnikiem erozyjności opadów EI_{30} a splywem powierzchniowym (A) i erozją gleby (B) dla poletek bez roślin o długości 11 m i nachyleniu 8° i 11°

Fig. 5. Relationship between rainfall erosivity index (EI_{30}) and runoff per unit area (A), and soil erosion (B) for plots 10 m long under black fallow and slope of 8° and 11°

wanie w poszczególnych latach było zróżnicowane i nawiązywało do warunków pogodowych. Najwyższe wartości splukiwania na wszystkich poletkach wystąpiły w 2007 roku i były skutkiem 2 opadów o znacznej – jak na badany obszar – erozyjności (3 lipca – 131,7 i 5 lipca – 211,4 MJ mm ha⁻¹h⁻¹) oraz 4 opadów o erozyjności powyżej 50 MJ mm ha⁻¹h⁻¹. Podczas opadu 5.07.2007 r. z poletka utrzymywanego bez roślin zostało zerodowane ponad 8 kg materiału glebowego, a z poletka z ziemniakami prawie 6 kg. Również wówczas zanotowano największe straty gleby z poletka ze zbożem – 0,5 kg. Znacznie mniejszym natężeniem splukiwania cechował się 2008 rok, w którym erozyjność opadów była 3 razy mniejsza niż w 2007 roku. Warunki pogodowe w 2008 roku, polegające na występowaniu opadów o znacznej intensywności jedynie przez 15 minut, nie sprzyjały formowaniu się spływu. Najczęściej spływ ustawał już w początkowej fazie opadu, na etapie jego formowania się. Takie chwilowe 10-15 minutowe natężenie opadu w granicach 0,5 mm min⁻¹ powodowało znaczny rozbryzg gleby, dzięki któremu następowało uruchamianie cząstek gleby oraz ich transport przez niewielki objętościowo spływ powierzchniowy, w granicach 0,5-1,5 dm³. Jedynie wzdłuż bruzd w uprawie ziemniaka spływ był ułatwiony i w efekcie erozja gleby była tu większa niż na czarnym ugorze. Koncentracja materiału podczas tych opadów, wynosząca 30-50 g dm⁻³, nie była duża. Dla porównania koncentracja materiału podczas opadów o erozyjności >100 MJ mm ha⁻¹h⁻¹ kształtowała się w granicach 90-120 g dm⁻³.

Podatność gleby na erozję analizowano wyznaczając czynnik K, który w modelu USLE jest stosunkiem wielkości erozji (Mg ha⁻¹) do czynnika EI₃₀ (MJ mm ha⁻¹h⁻¹). Wyznaczona eksperymentalnie średnia roczna wartość czynnika K (0,0041) okazała się zbliżona do określonego z modelu USLE (0,0039) na podstawie nomogramu. Wartość K dla poszczególnych pomiarów była zróżnicowana i zawierała się w zakresie 0,0002-0,0093 Mg h MJ⁻¹mm⁻¹ (tab. 3).

Wyraźnie widoczne jest również sezonowe zróżnicowanie erozji, związane z rozwojem szaty roślinnej. Wskaźnik okrywy roślinnej C wyznaczony eksperymentalnie (stosunek zmytej gleby z poletka z roślinnością do zmytej gleby z poletka bez roślinności, z tzw. „czarnego ugoru”) wskazuje na znaczenie danej rośliny w ograniczaniu erozji. Średnia wartość C dla zboża wyniosła 0,064, dla ziemniaka 0,8 (tab. 3). Wysoka wartość czynnika okrywy roślinnej dla zboża wynika nie tylko z wystąpienia opadów o znacznej erozyjności wiosną i wczesnym latem (pomiarzy w dniach 26.05 i 2.07.2007 oraz 4.07.2009), ale również ze słabej jakości gleby warunkującej rozwój roślin. Wartość C zmieniała się od 1,52-1,25 w maju do 0,02-0,05 w pełni okresu wegetacyjnego, przyjmując najniższe wartości 0,005-0,01, gdy na poletku było rżysko. Sezonowo zmieniała się także wartość wskaźnika w uprawie ziemniaka: od 4,5 wiosną do 0,3-0,6 latem i do 0,7-0,8 przed wykopkami, gdy następuje zasychanie roślin.

Zależność między erozją gleby a wielkością opadu i czynnikiem EI₃₀ przedstawia rysunek 6. Podobnie jak w przypadku spływu, erozja gleby nie wykazuje

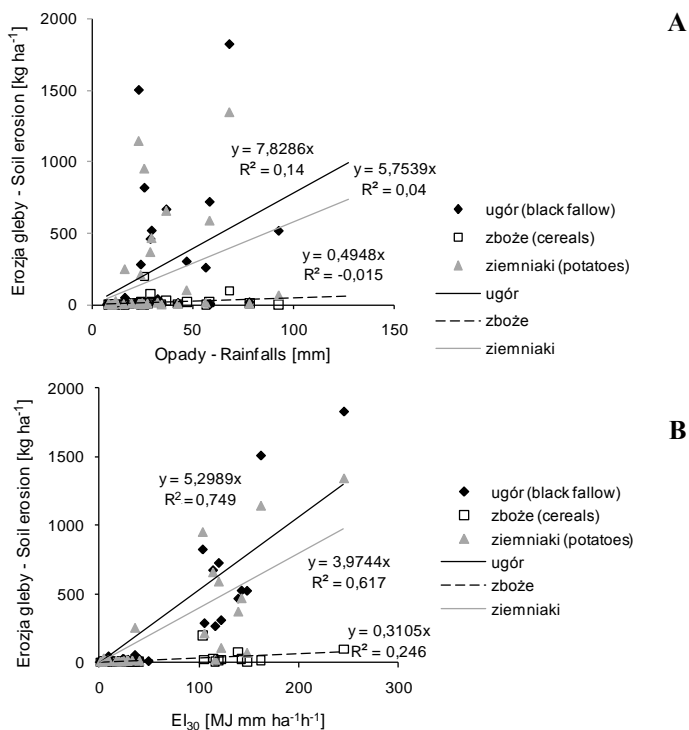
Tabela 3. Erozja gleby i wybrane parametry warunków dynamiki procesu (opad deszczu, czynnik erozyjności deszczów EI₃₀, podatność gleby na erozję K, czynnik okrywy roślinnej C) dla poletek z różnym użytkowaniem

Table 3. Soil erosion and chosen parameters of soil erosion condition (rainfalls, rainfall erosivity EI₃₀, soil erodibility K, canopy cover factor C) on plots with various crops

Data pomiaru (Data of measurement)	P [mm]	*EI ₃₀	Erozja gleby (Soil erosion) kg ha ⁻¹			**K	Czynnik C (Canopy cover factor)	
			Czarny ugór (Black fallow)	Zboże (Cereal)	Ziemniaki (Potatoes)		Zboże (Cereals)	Ziemniaki (Potatoes)
15.12.06	28,8	6,9	16,34	-	-	0,0024	-	-
19.04.07	7,4	7,6	45,70	-	-	0,0008	-	-
11.05.07	15,8	6,1	3,46	4,34	5,50	0,0006	1,2549	-
26.05.07	26	103,6	819,56	197,09	950,52	0,0079	0,2405	1,1598
9.06.07	19,7	32,9	11,40	7,24	10,81	0,0003	0,6349	0,9484
2.07.07	36,9	113,9	668,70	29,10	655,62	0,0059	0,0435	0,9804
3.07.07	29,6	142,6	520,4	23,87	465,61	0,0036	0,0491	0,9572
4.07.07	24,2	105,3	282,81	20,02	208,14	0,0027	0,0708	0,7360
16.07.07	68,2	245,4	1823,21	97,08	1343,90	0,0074	0,0532	0,7371
10.08.07	56,5	116,2	260,78	2,68	15,33	0,0022	0,0103	0,0588
17.09.07	92,7	148,1	518,41	2,79	66,48	0,0035	0,0054	0,1282
27.10.07	23,6	16,7	6,51	4,99	9,08	0,0004	-	-
2007	429,4	1045,2	4936,31	389,19	3731,00	0,0047	0,0788	0,7629
9.05.08	8,8	8,6	3,75	5,71	4,55	0,0004	1,5211	-
30.05.08	11,8	4,2	2,28	3,07	26,13	0,0005	1,3452	11,4583
16.06.08	16,3	35,6	51,02	1,40	249,00	0,0014	0,0275	4,8807
1.07.08	25	27,6	11,33	0,59	12,35	0,0004	0,0519	1,0903
16.07.08	47	122,1	304,67	21,27	101,86	0,0025	0,0698	0,3343
26.07.08	8,2	5,3	7,97	3,76	6,12	0,0015	0,4726	0,7677
21.08.08	58,4	119,7	721,15	16,25	587,69	0,0060	0,0225	0,8149
27.09.08	24,2	6,0	10,31	4,31	8,03	0,0017	0,4175	0,7784
10.11.08	32,6	9,0	41,63	13,67	16,69	0,0046	-	-
2008	232,3	338,2	1154,11	70,02	1012,43	0,0034	0,0507	0,8940
5.05.09	10,6	0,9	3,51	1,95	1,99	0,0037	0,5548	-
16.05.09	24,2	21,9	5,11	2,97	2,35	0,0002	0,5813	0,4599
25.05.09	25,6	23,5	23,17	9,07	4,14	0,0010	0,3912	0,1789
8.06.09	34,6	17,3	7,67	6,14	2,39	0,0004	0,7998	0,3119
2.07.09	24,7	28,0	15,39	5,31	5,71	0,0006	0,3451	0,3711
5.07.09	29	139,3	461,67	75,95	367,98	0,0033	0,1645	0,7971
13.07.09	25,8	19,7	7,09	2,14	4,49	0,0004	0,3017	0,6335
29.07.09	23,2	24,5	20,34	4,66	6,36	0,0008	0,2290	0,3125
26.08.09	27,6	28,7	16,41	3,82	10,00	0,0006	0,2330	0,6093
31.08.09	23,2	162,0	1502,94	13,98	1142,88	0,0093	0,0093	0,7604
17.09.09	10	3,1	2,02	0,00	0,00	0,0006	0,0000	0,0000
30.10.09	78,2	40,1	19,74	7,29	7,96	0,0005	-	-
2009	354,9	508,9	2085,05	133,26	1556,26	0,0041	0,0610	0,7500
Średnio rocznie (Mean annual)	338,9	630,8	2725,16	197,49	2099,90	0,0041	0,0635	0,8023

*EI₃₀ [MJ mm ha⁻¹h⁻¹], ** K [Mg h MJ⁻¹mm⁻¹]

zależności od wydajności opadu, natomiast znacznie lepiej jest ona skorelowana z erozyjnością deszczu. Zależność ta zazwyczaj jest opisywana funkcją liniową. Dla poletka utrzymywanego w czarnym ugorze otrzymano korelację $r^2=0,76$, z uprawą ziemniaka $r^2=0,61$, natomiast dla poletka ze zbożem brak jest korelacji ($r^2=0,25$). Zależność tę dla czarnego ugoru i ziemniaka nieco lepiej opisuje trend o typie wielomianu, dla którego otrzymano odpowiednio następujące zależności $r^2=0,85$ ($y=0,003x^2+0,103x$) i $r^2=0,67$ ($y=0,002x^2+0,125x$).



Rys. 6. Zależność pomiędzy erozją gleby i sumą opadów (A) oraz czynnikiem EI₃₀ (B) dla poletek o długości 22,1 m.

Fig.6. Relationship between soil erosion and amount of rainfall (A), and EI₃₀ index (B) for plots 22,1 long.

O intensywności erozji w okresie badań decydowały warunki pogodowe okresu wegetacyjnego. Masa materiału odprowadzona wraz ze spływem roztopowym była niewielka i wynosiła od 8 kg ha⁻¹ na poletku z ozimną (2008) do 61 kg ha⁻¹ z czarnym ugorzem (2007) i stanowiła jedynie niewielką część całkowitej erozji gleby. W poszczególnych latach erozja przypadająca na roztopy stanowiła 1-2% rocznej erozji na czarnym ugorze i ziemniakach. Na poletkach ze zbożem roztopy miały większe znaczenie, na okres ten przypadło 11-21% rocznej erozji gleby.

Porównanie erozji gleby z poletek o długości 11 m i nachyleniu 8° i 11° podobnie jak w przypadku spływu wskazuje, że większe o 3 stopnie nachylenie jest nieistotne dla opadów o niewielkiej erozyjności. Odzwierciedla to zmiana linii trendu dla wartości EI_{30} około 50 MJ mm ha⁻¹h⁻¹ (rys. 5B).

DYSKUSJA

Zróznicowany pod względem wydajności i intensywności opadów 3-letni okres pomiarów erozji gleby z zastosowaniem metody poletkowej pozwolił na uzyskanie danych ilościowych. Średnie roczne wartości erozji ze standardowych poletek wg USLE w uprawie zbóż i ziemniaków oraz z czarnego ugoru wyniosły odpowiednio 0,2 i 2,1 t ha⁻¹ oraz 2,75 t ha⁻¹. Są to wartości zbliżone do uzyskanych w badaniach prowadzonych na Mazurach, które mieszczą się w zakresie 0,1 (zboża) – 10 t ha⁻¹ (okopowe) (Niewiadomski 1964, 1968, Niewiadomski, Skrodzki 1964). Na poletkach w Storkowie, na Pomorzu Zachodnim, średni roczny zmyw na glebie płowej, rozwiniętej na piaskach gliniastych, wynosił 1,1-2,7 t ha⁻¹ dla zbóż, 19,2 dla ziemniaków i 4,64 t ha⁻¹ dla czarnego ugoru (Szpikowski 1998, 2002), a więc był większy niż na glebie piaszczystej. Również spływy na glebie piaszczysto-gliniastej były co najmniej kilkakrotnie większe (Szpikowski 2002). Według badań R. Klimeczaka (1993) prowadzonych również w okolicy Storkowa w latach 1987-89, erozja gleby wyniosła 0,2-19,2 t ha⁻¹. Pomiary na obszarach wysoczyzny morenowej w północnych Niemczech wskazują na średnią roczną erozję rozproszoną i żłobinową łącznie w granicach od 20 do 35 t ha⁻¹ na gruntach zajętych odpowiednio pod uprawę zbóż i roślin okopowych (Auerswald 2006, Auerswald i in. 2009). Przeprowadzone pomiary wykazują znacznie zróżnicowane wartości erozji gleby. Szacowane zagrożenie erozją wodną gleb pojezierzy w zależności od przyjętego modelu jest także znacznie zróżnicowane, od 2 do 10 t ha⁻¹, a dla pobraży do 20 t ha⁻¹ (van Rompaey i in. 2003). Rozpoznanie erozji w warunkach pojezierzy nie jest wystarczające i wymaga dalszych badań, a szczególnie rozpoznania roli późnowiosennych i wczesnoletnich ulew, określanych jako opady „burzowe” (Uggla i in. 1998).

Opady o erozyjności poniżej 20 MJ mm ha⁻¹h⁻¹ można uznać za mało efektywne niezależnie od ich wydajności. Spływy, jakie w ich wyniku były generowane ze standardowego poletka wg USLE bez roślin lub z uprawą ziemniaka, nie przekraczały 2,5 dm³, a w uprawie roślin zbożowych (żyto, mieszanka) można je określić jako śladowe (do 0,5 dm³). Współczynnik spływu poniżej 0,1% wskazuje, że praktycznie prawie cały opad został „zużyty” na mikroretencję. Podobnie niewielki współczynnik spływu dla deszczy rozlewnych, jakie w badanym obszarze występują zwykle na wilgotnym gruncie, wskazuje na bardzo dobrą infiltrację wody opadowej. Przeprowadzone pomiary na czarnym ugorze pozwalają stwierdzić, że proces splukiwania zachodził przede wszystkim w wa-

runkach hortonowskiego spływu nienasyconego, najprawdopodobniej jedynie w krótkim czasie, kiedy przesuszona gleba uniemożliwiała infiltrację lub wówczas, gdy intensywność opadu przekraczała duże zdolności infiltracyjne piasków. Druga sytuacja miała miejsce sporadycznie. Na podstawie zmierzonych objętości spływu, wyraźnie odbiegających od pozostałych, jak: 5.07.2007 i 30.08.2009, kiedy objętość spływu osiągnęła 70 i 57 dm³ na czarnym ugorze, można sądzić, że taka sytuacja miała miejsce przy natężeniu opadu około 1 mm min⁻¹. Wówczas także erozja osiągała największe rozmiary.

Uzyskane wyniki pomiarów potwierdzają szczególną rolę takich krótkotrwałych opadów „burzowych”. Ich efektywność jest silnie uwarunkowana stopniem rozwoju szaty roślinnej. Przeprowadzone badania wykazały, że wskaźniki wyznaczone w badaniach amerykańskich (Wischmeier, Smith 1978) należy stosować z dużą ostrożnością w warunkach klimatyczno-glebowych Polski NE. Eksperymentalnie wyznaczony wskaźnik okrywy roślinnej C w poszczególnych latach okazał się zróżnicowany. W Polsce północno-wschodniej, gdzie okres wegetacyjny jest krótszy niż w innych nizinnych regionach kraju, rozwój roślin następuje z pewnym opóźnieniem. W początkowej fazie wzrostu zbóż w maju i czerwcu, a w przypadku ziemniaków również w pierwszym tygodniu lipca, wartość tego wskaźnika dla zbóż kształtowała się w zakresie 0,56-0,79, zaś dla ziemniaków 0,9-1,5.

Podatność gleb na erozję jest ważnym parametrem w prognozowaniu zagrożenia erozją stoków użytkowanych jako grunty orne. Podatność gleb piaszczystych jest różnie oceniana, od słabej do średniej, w zależności od przyjętej metody badań: kubkami rozbryzgowymi, stabilnością agregatów czy minipoletkami testowymi (Gumiere i in. 2009). Średnia wartość wskaźnika podatności na erozję K ustalona eksperymentalnie wyniosła 0,0041 i była zbliżona do określonej wg USLE (0,0039). Należy jednak zaznaczyć, że w 3-letnim okresie badań, w poszczególnych sezonach wartości K były znacznie zróżnicowane (od 0,0003 do 0,0093). Nadal potrzebna jest weryfikacja parametru K, szczególnie w warunkach naturalnych (Bissonnais i in. 2005, Gumiere i in. 2009).

PODSUMOWANIE

Okres badań 2007-2009 cechował się zróżnicowanymi warunkami pogodowymi. Roczna suma opadów kształtowała się od 453 (2008) do 638 mm (2007), zaś erozyjność opadów i spływów wyniosła odpowiednio 1213 i 453 MJ mm ha⁻¹h⁻¹. Opady określane jako „burzowe” wystąpiły w 2007 i 2009 roku. Badania potwierdziły szczególną rolę tych zdarzeń w erozji gleb piaszczystych. Spływy osiągały wówczas największą objętość i wystąpiły najwyższe wartości erozji. Udział takich pojedynczych zdarzeń w rocznej erozji gleby stanowił od 30% (ziemniaki) do 50% (zboża).

Średnia roczna wartość erozji ($0,2 \text{ t ha}^{-1}$ w uprawie roślin zbożowych i $2,1 \text{ t ha}^{-1}$ w uprawie ziemniaka (w rzędach zgodnie z nachyleniem stoku) była zbliżone do występujących na innych pojezierzach w Polsce lub nieco niższa.

Splyw powierzchniowy jak i straty gleby nie są skorelowane z sumami opadów, natomiast wykazują korelację z czynnikiem erozyjności opadu EI_{30} , najlepszą dla czarnego ugoru (odpowiednio 0,82 i 0,85), najslabszą w przypadku zbóż (0,5 i 0,25) oraz pośrednią dla ziemniaków (0,77 i 0,67). Najlepiej zależność opisuje funkcja wielomianu drugiego stopnia (poletka z czarnym ugozem i ziemniakiem) lub liniowa (zboże). Szczególne znaczenie dla formowania się spływu i erozji gleby miało natężenie opadu, natomiast wydajność opadu, ze względu na bardzo dobrą przepuszczalność piasków luźnych miała znaczenie drugorzędne.

Średnia roczna wartość wskaźnika podatności gleby na erozję wyznaczona empirycznie ($K=0,0041$) ma wartość zbliżoną do wyznaczonej z modelu USLE (0,0039). Wskaźnik okrywy roślinnej C wyniósł średnio rocznie 0,064 dla zboża i 0,8 dla ziemniaków, w poszczególnych sezonach był znacznie zróżnicowany.

Okres roztopowy nie odegrał znaczącej roli w erozji gleby, głównie ze względu na kilkukrotne roztopy śródziemowe w latach 2007-2008 i na powolne topnienie śniegu wiosną 2009 roku. Jego udział w średniej rocznej masie erodowanej gleby wyniósł od 1,5% na poletku bez roślin do 17% ze zbożem.

PODZIĘKOWANIA

Badania były realizowane w ramach projektu KBN nr 2P04E 05 330. Składam podziękowania Państwu Leszczyńskim i Krzywickim z Udziejka za umożliwienie prowadzenia pomiarów erozji gleby na ich gruntach oraz pomoc w pracach polowych.

Literatura:

- Auerswald K., 2006, Germany, [w:] J. Boardman, J. Poesen (red.), *Soil Erosion in Europe*, Wiley and Sons, 213–230.
- Auerswald K., Fiener P., Dikau R., 2009, Rates of sheet and rill erosion in Germany – A meta-analysis. *Geomorphology* 111, 182–193.
- Boardman J., 2006, Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches, *Catena* 68, 73–86.
- Brown L.C., Foster G.R., 1987, Storm erosivity using idealized intensity distributions, *Transactions of the ASAE* 30, 379–386.
- Bryan R.B., 2000, Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope, *Geomorphology*, 32, 385–415.
- Chudecki Z., Niedźwiecki E., 1983, Nasilanie się erozji wodnej na obszarach słabo urzeźbionych Pomorza Zachodniego, *Zesz. Problem. Postępu Nauk Roln.* 272, 7–18.

- Gumiere S.J., Le Bissonnais Y., Raclot D., 2009, Soil resistance to interrill erosion: Model parameterization and sensitivity, *Catena* 77, 274–284.
- Józefaciuk A, Józefaciuk Cz, 1995, Erozja agroekosystemów. *Bibl. Monitor. Środ.*, Warszawa, 1–168.
- Józefaciuk Cz., 1991, Procesy spłukiwania i erozji wąwozowej, [w:] L. Starkel (red.), *Geografia Polski. Środowisko przyrodnicze*. PWN, Warszawa, 420–425.
- Klimczak R., 1993, Spłukiwanie na obszarach o zróżnicowanym użytkowaniu – przebieg i rola we współczesnym środowisku morfogenetycznym (zlewnia Młyńskiego Potoku, Pomorze Zachodnie, [w:] A. Kostrzewski (red.), *Geoekosystem obszarów nizinnych*, Kom. Nauk. PAN „Człowiek i środowisko” Zesz. Nauk. 6, 61–77.
- Le Bissonnais Y., Cerdan O., Lecomte V., Benkhadda H., Souchere V., Partin P., 2005, Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena* 62, 111–124.
- Niewiadomski W., 1964, System gospodarki w zlewni mazurskiej w świetle 10-letnich badań WSR w Olsztynie, *Zesz. Nauk. AR Olsztyn* 17, 2, 171–192.
- Niewiadomski W., 1968, Badania nad erozją gleb na północy Polski (okres 1950-1976), [w:] S. Ziemnicki (red.), *Procesy erozyjne i problem ochrony i problem ochrony gleby w Polsce*. WSR Lublin, PWRiL, 2, 29–49.
- Niewiadomski W., 1998, Ochrona przeciwerozynna - systemy regionalne. Wprowadzenie do konferencji. *Bibliotheca Fragmenta Agron.* 4A, 10–11.
- Niewiadomski W., Skrodzki H., 1964, Nasilenie spływów i zmywów z system rolniczego zagospodarowania ziemi. *Zesz. Nauk. WSR w Olsztynie* 17, 2, 269–291.
- Rompaey van A., Vieillefont V., Jones R.J.A., Montanarella L., Verstraeten G., Bazzoffi P., Dostal T., Krasa J., de Vente J., Poesen J., 2003, *Validation of soil erosion estimates at European scale*. European Soil Bureau Research Report No. 13, Office for official Publicatino of the European Communities, Luxemburg, 1–26.
- Stopa-Boryczka, M., Martyn D., 1985, Klimat, [w:] *Województwo Suwalskie – studia i materiały 1*, OBN Białystok i IGiPZ PAN, Warszawa, 81–118.
- Szpikowski J., 1998, Wielkość i mechanizm erozji wodnej gleb na stokach użytkowanych rolniczo w zlewni młodoglacjalnej (Górna Parsęta, Chwalimski Potok), PTNA, Olsztyn, *Bibliotheca Fragmenta Agron.* 4A, 113–124.
- Szpikowski J., 2002, Contemporary processes of soil erosion and the transformation of the morphology of slopes in agricultural use in the postglacial catchment of the Chwalimski Potok (upper Parseta, Drawskie Lakeland). *Quaest. Geogr.* 22, 79–90.
- Uggla H., Mirowski Z., Garbarczyk S., Nożyński A., Rytelewski J., Solarzski H., 1962, Strefy zagrożenia erozją wodną gleb regionu północno-wschodniego Polski. *Zeszyty Nauk. WSR Olsztyn* 23, 565, 225–242.
- Uggla H., Mirowski Z., Garbarczyk S., Nożyński A., Rytelewski J., Solarzski H., 1968, Proces erozji wodnej w terenach pagórkowatych północno-wschodniej Polski. *Rocz. Gleb.*, 18, 2, 415–447.
- Uggla H., Solarzski H., Rytelewski J., Mirowski Z., Nożyński A., Grabarczyk S., 1998, Problematyka erozji wodnej gleb północno-wschodniej Polski. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica* 4B, 179–197.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978, *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*. Agricultural Handbook No. 537, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1–58.