

## Parametry opadu deszczu wpływające na pojemność wodną korony drzew w warunkach kontrolowanych

Rainfall parameters affect canopy storage capacity under controlled conditions

**Anna Klamerus-Iwan**

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Inżynierii Leśnej,  
Al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków, Poland

Tel. + 48 12 6625356, fax +48 12 4119715, e-mail: annaklamerus.iwan@gmail.com

**Abstract.** The subject of this research was the interception of precipitation, which is defined as the amount of water that can be retained by the entire surface of a tree. The aim was to measure the rate of interception under laboratory conditions in order to determine influential factors. To eliminate water absorption that would occur in living trees, we employed models of deciduous and coniferous trees enabling us to examine the effect of precipitation characteristics and the surface area individually. A sprinkler system that automatically recorded the amounts of water retained on the models was set up in the laboratory. Precipitation was simulated using 5 different intensities with 3 different raindrop sizes.

Interception rates were affected by both, the intensity of the precipitation and raindrop size. The time required to reach maximum crown filling with water was variable and depended on plant surface parameters as well as simulated precipitation. The maximum water capacity of crowns was not a constant value even within one tree model, but changed depending on precipitation characteristics.

**Key words:** area of trees, interception tank, mock trees, rainfall intensity, size of raindrops, sprinkler set

### 1. Wstęp

Intercepcja drzew jest składową bilansu ‘atmosfera – drzewostan – gleba’. Zjawisko to dotyczy fazy zasilania bilansu w wodę. Jako ilość wody zatrzymana na powierzchni roślin zmniejsza przyrost zapasu wody w glebie (Suliński 1993; Xiao et al. 2000; Barbier et al. 2009).

W sensie liczbowym intercepcja jest istotną składową bilansu wodnego. Pike i Scherer (2003) wyrazili nawet pogląd, że jest kluczowym problemem hydrologii leśnej. Zinke (1967) i Webb (1975) wskazywali na możliwość przechwycenia przez drzewa 10–30% całego opadu deszczu. Calder (1999) określał wartość intercepcji nawet na 50%. Intercepcja, niezależnie od różnic w składzie gatunkowym, strukturze i gęstości lasu, jak

również w charakterystyce deszczu związanej z odmiennymi warunkami klimatycznymi, powinna być uwzględniana w modelach symulujących takie procesy, jak: ewapotranspiracja, odpływ wody z gleby, retencja gruntowa i inne (Chang 2003) lub też w bilansach wodnych o specjalnym przeznaczeniu, na przykład w badaniach geochemicznych (Hörmann et al. 1996), lub obiegu azotu w atmosferze (Loescher et al. 2002) czy w klimatycznych bilansach terenów zalesionych (Okoński, Miler 2006).

Piśmiennictwo, w którym można znaleźć dane z pomiarów intercepcji wykonywanych w określonych warunkach geograficznych i drzewostanowych, jest obszerne. W Polsce bogatym źródłem danych dotyczących intercepcji drzewostanów są liczne prace Olszewskiego (1965, 1975, 1984). Próbę zestawienia wielkości inter-

cepcji uzyskanych w lokalnych obserwacjach podjęli na przykład Pei i in. (1993). Większość badaczy wyznaczała intercepcję drzew jako różnicę wielkości opadu nad i pod koronami drzew (Olszewski 1975, 1984; Aston et al. 1979; Jetten 1996; Feliksik et al. 1996; Calder 2001; Gomez et al. 2001; Bryant et al. 2005). Przestrzenny i czasowy rozkład intercepcji jest trudny do ilościowego zestawienia, dlatego przeważają opinie, że w praktyce trudno jest porównać uzyskane wyniki ze względu na zróżnicowanie metod, miejsca i czasu pomiaru (Croford, Richardson 2000; Jong, Jetten 2007).

Rola natężenia deszczu w kształtowaniu wielkości intercepcji roślin jest istotna, lecz zagadnienie to należy uznać za słabo poznane, dlatego między innymi Asdak i in. (1998) a także Toba i Ohta (2008) postulują potrzebę rozwinięcia prac i doświadczeń laboratoryjnych z tego zakresu.

Badania przy użyciu zraszacza w laboratorium prowadzili Hall i Calder (1993), Garcia-Estringana i in. (2010). Według wyników prac Caldera i in. (1996) oraz Caldera (1999) zdolność korony do zatrzymywania wody rośnie, gdy krople deszczu maleją i zmniejsza się jego natężenie. Podobne badania intercepcji w warunkach laboratoryjnych przeprowadzili między innymi: Pei i in. (1993), Suliński i in. (2001), Keim i in. (2006).

Celem badań było zmierzenie intercepcji, w warunkach laboratoryjnych, w taki sposób, aby było możliwe ustalenie czynników wpływających na jej wielkość

## 2. Materiał i metody

Doświadczenia wykonano na dwóch makietkach symulujących gatunki iglaste i liściaste. Użycie do badań makiet podyktowane było koniecznością poznania procesu intercepcji na powierzchniach niezmiennających swoich właściwości fizycznych wskutek zwilżania wodą, zarówno w czasie trwania pojedynczego deszczu, serii pomiarowych, jak i cykli badawczych. Materiał z jakiego wykonano makiety drzew był nienasiąkliwy wodą. Do budowy makiet użyto dostępnych w sklepach ogrodniczych sztucznych gałązek, z których uformowano drzewka zbliżone do naturalnych. W przypadku makiety liściastej wzorem był buk zwyczajny a makiety iglastej – sosna zwyczajna. Sztuczne drzewka miały 110 cm wysokości. Powierzchnię makiet określono jako sumę powierzchni części pnia, gałęzi i liści/igieł. Przyjęto metodykę pomiarów opartą na bezpośrednim skanowaniu elementów drzewek lub ich fotografii. Analizy i obliczenia wykonano w programie Sigma Scan v.2.

Wykonanie podobnych doświadczeń w odniesieniu do żywych drzew należałoby rozpatrywać pod kątem nasiąkania kory wodą. Wyniki doświadczeń z udziałem makiet drzew liściastych i iglastych posłużyły również

jako wartości kontrolne i porównawcze dla wartości intercepcji uzyskanych w przypadku żywych drzewek. Stanowisko laboratoryjne przygotowane do pomiaru intercepcji wymienionych drzewek opisane zostało przez Klamerus-Iwan i inni (2013).

Na każdej z makiet wykonano dwa pełne cykle doświadczeń. Każdy cykl składał się z trzech serii różniących się wielkością kropeł ze zraszacza wody (0,45; 0,50; 0,60 mm). W ramach każdej serii wykonano 5 powtórzeń różniących się natężeniem opadu (5, 10, 15, 20, 25 mmh<sup>-1</sup>). Schemat doświadczeń przedstawiono w pracy Klamerus-Iwan i in. (2013a). Łącznie cykl doświadczeń na jednej makiecie obejmował 15 powtórzeń doświadczenia.

Istotnym założeniem przy przebiegu wszystkich doświadczeń było utrzymywanie w laboratorium stałych, powtarzalnych warunków temperatury i wilgotności. Termohigrograf rejestrował wilgotność względną na poziomie 20–25% oraz temperaturę w zakresie 19–23°C. Do doświadczeń używano wody destylowanej o temperaturze 21(+/-1) °C. W warunkach naturalnych również najczęściej temperatura opadu deszczu jest o 1–2°C niższa niż temperatura powietrza.

Mając na uwadze niewielkie rozmiary drzewek użytych do doświadczenia, należało możliwie skrupulatnie uwzględnić różnorodność powierzchni. W tym celu przyjęto metodykę pomiarów opartą na bezpośrednim skanowaniu elementów lub ich fotografii (Owsiak et al. 2012).

Analiza statystyczna polegała na znalezieniu czynników, które są odpowiedzialne za wielkość intercepcji uzyskiwanej dla każdego powtórzenia doświadczenia. Zastosowano wielowymiarowe testy istotności (Statistica v.10). Najlepsze predyktory zestawiono dla obu makiet łącznie oraz osobno dla liściastej i iglastej.

## 3. Wyniki

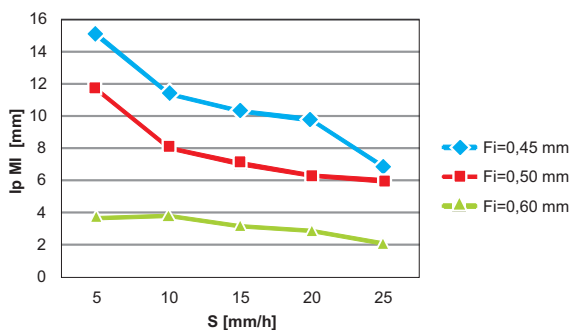
Zastosowane procedury obliczenia wielkości powierzchni badanych makiet a także drzewek są pracochłonne, zapewniają jednak, że uzyskane wyniki są wysoce wiarygodne i można na nich oprzeć dalsze analizy. Powierzchnia makiety liściastej to 0,216 m<sup>2</sup>, a makiety iglastej – 0,310 m<sup>2</sup>.

Rzut korony na płaszczyznę poziomą, określony na podstawie zdjęcia wykonanego aparatem umieszczonym centralnie nad koroną dla obu makiet był bardzo podobny (stosunek powierzchni zajętej przez rzut korony do płaszczyzny objętej zraszaniem): makieta liściasta to 0,702 i makieta iglasta to 0,712.

Pomiary intercepcji wykonywano z jednonminutowym odstępem czasowym. Ustalenie punktu wystąpienia maksymalnej intercepcji dla danego przebiegu

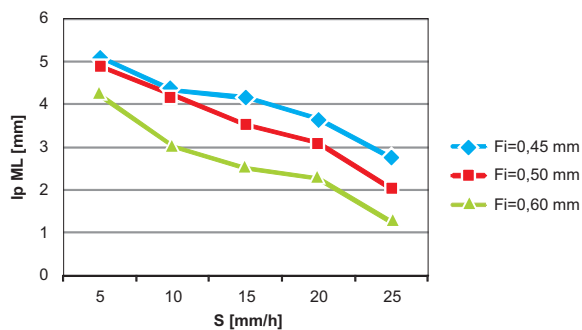
doświadczenia odczytywano z krzywej intercepcji. Krzywa ta obrazowała przyrastające na makietach ilości wody w czasie ( $t$ ) trwania doświadczenia. Wartości prezentowane na rycinie 1 i 2 to wartości maksymalnej ilości wody ( $I_p$ ), jaka może się zatrzymać na makiecie przy określonej charakterystyce opadu. Dla każdej makiety i każdego powtórzenia doświadczenia ustalono inny czas ( $T$ ) konieczny do osiągnięcia intercepcji potencjalnej ( $I_p$ ). Wszystkie dane przedstawiono graficznie na rycinach 1 i 2, według natężenia symulowanego opadu deszczu i wielkości kropeł z rozdzielaniem na makietę liściastą i iglastą.

Poszukiwano czynników, które mogłyby wytłumaczyć, dlaczego uzyskane na makietach drzew wartości intercepcji różnią się od siebie w każdym powtórzeniu doświadczenia. Jeśli o intercepcji decydowałyby tylko wielkość powierzchni rośliny wówczas wartości  $I_p$  różniłyby się między makietami, ale nie przy zmianach parametrów symulowanego deszczu. Statystycznie poszukiwano najlepszych predyktorów dla zmiennej zależnej, tj. intercepcji potencjalnej.



Rycina 1. Zależność intercepcji potencjalnej ( $I_p$ ) od natężenia symulowanego opadu ( $S$ ) i rozmiaru użytych kropeł ( $F_i$ ) w przypadku makiety iglastej (MI)

Figure 1. Relationship of potential interception ( $I_p$ ) and rainfall intensity ( $S$ ) and used droplet size ( $F$ ) in the case of coniferous mock-up (MI)



Rycina 2. Zależność intercepcji potencjalnej ( $I_p$ ) od natężenia symulowanego opadu ( $S$ ) i rozmiaru użytych kropeł ( $F_i$ ) w przypadku makiety liściastej (ML)

Figure 2. Relationship of potential interception ( $I_p$ ) and rainfall intensity ( $S$ ) and used droplet size ( $F$ ) in the case of deciduous mock-up (ML)

W przypadku roślin drzewiastych występuje jakościowa różnorodność powierzchni aparatu asymilacyjnego oraz zdrewniałych pędów, których pokrycie zmienia się z wiekiem obiektu.

W przypadku makiet wykonanych z tworzywa sztucznego trudno mówić o wpływie cech gatunkowych, więc wielkość powierzchni ( $A$ ) jest wartością odróżniającą makietę liściastą od iglastej (tab. 1).

Brak możliwości uchwycenia cech typowych dla drzew iglastych i liściastych (naturalne różnice morfologiczne nago- i okrytonasiennych) powodował, że niemożliwe jest wnioskowanie o wpływie cech gatunkowych. Wpływ istotnych czynników można analizować osobno dla makiety iglastej (tab. 2) i makiety liściastej (tab. 3).

Tabela 1. Zestawienie najlepszych predyktorów dla zmiennej  $I_p$  (intercepcji potencjalnej) dla obu makiet łącznie (liściastej i iglastej)

Table 1. Selection of the best predictors for the variable  $I_p$  (potential interception) for both mock-ups in total (deciduous and coniferous)

Makiety liściasta i iglasta (łącznie) Mock-ups in total (deciduous and coniferous)	Najlepsze predyktory dla zmiennej zależnej $I_p$ [mm] Best predictors for the variable $I_p$ [mm]	
	$F$	$p$
$A$ [m <sup>2</sup> ]	13,496	0,001
$F_i$ [mm]	6,276	0,00577
$T$ [min]	3,908	0,00575

Oznaczenia / Explanation:

$A$  – powierzchnia sztucznego drzewka z pomiaru bezpośredniego / area of artificial trees from direct measurement,

$F_i$  – rozmiar kropeł symulowanego deszczu / droplet size of simulated rain,

$T$  – czas niezbędny do osiągnięcia wartości intercepcji maksymalnej / time necessary to achieve the maximum interception,

$F$  – test FSnedecora / test FSnedecora,

$p$  – poziom istotności / significance level.

Tabela 2. Najlepsze predyktory dla zmiennej zależnej  $I_p$  dla makiety iglastej

Table 2. The best predictors for the variable  $I_p$  for model of coniferous tree

Makieta iglasta Coniferous mock-up	Najlepsze predyktory dla zmiennej zależnej $I_p$ [mm] Best predictors for the variable $I_p$ [mm]	
	$F$	$p$
$F_i$ [mm]	15,41	0,00048
$T$ [min]	1,82	0,20496
$S$ [mm/h]	0,679	0,62197

Oznaczenia / Explanation:

$S$  – natężenie symulowanego opadu deszczu / simulated rainfall intensity,

Inne jak w tab. 1 / Other as in Table 1

**Tabela 3. Najlepsze predyktory dla zmiennej zależnej  $I_p$  dla makiety liściastej**Table 3. The best predictors for the variable  $I_p$  for model of deciduous tree

Makieta liściasta Deciduous mock-up	Najlepsze predyktory dla zmiennej zależnej $I_p$ [mm]	
	Best predictors for the variable $I_p$ [mm]	
	$F$	$P$
$S$ [mm/h]	4,8078	0,02009
$F_i$ [mm]	2,7562	0,103514
$T$ [min]	1,2852	0,374507

Oznaczenia jak w tab. 1, 2 / Explantation as in Table 1, 2

Wysoką wartość poznawczą miałyby doświadczenie, w którym obie makiety miałyby taką samą powierzchnię a różniły się cechami typowymi dla drzew iglastych i liściastych.

Budowa i użycie do doświadczenia nad intercepcją w warunkach laboratoryjnych makiet drzew było zabiegiem pionierskim. W doświadczeniu makieta iglasta ma większą powierzchnię. W rzeczywistości taka sytuacja może wystąpić jedynie porównując  $S_w$  i  $J_d$  z Brz. W przypadku najbardziej rozpowszechnionych w Polsce drzewostanów ( $S_o$ ,  $D_b$ ) to właśnie gatunki liściaste charakteryzują się znacznie większą powierzchnią przechwytyjącą opad.

#### 4. Dyskusja

Proces intercepcji pojedynczego opadu deszczu można porównać do napełniania wodą nieszczelnego pojemnika. Powierzchnia drzew czy użytych w prezentowanych doświadczeniach makiet jest ekwiwalentem zbiornika intercepcyjnego.

Wyraźnie widać różnice ilościowe intercepcji zależne od wielkości powierzchni. Można wnioskować, że wielkość powierzchni jest w decydującym stopniu wyznacznikiem ilości zatrzymanej na roślinach wody (ryc. 1, 2; tab.1).

Makieta iglasta była większa i zatrzymała znacznie więcej wody. Takie zestawienie daje podstawy do zastanowienia się nad wpływem cech gatunkowych na ilość zatrzymanej wody. Przy makietach nie jest możliwe porównywanie właściwości kory czy kutikuli pokrywającej części zielone rośliny. Można jednak zastanowić się, czy szorstkowy układ igieł może zmagazynować więcej wody niż jest to w przypadku liści. Właściwe wydaje się przeliczanie intercepcji na jednostkę powierzchni a następnie porównanie jej między gatunkami. Wpływ cech gatunkowych podnoszony był w pracach Crocforda i Richardsona (2000), natomiast Byrant (2005) wykazał bardzo podobne straty na inter-

cepcję w drzewostanach liściastych, iglastych i mieszanych.

Na wykresach (ryc. 1, 2) widać wyraźnie, że na wysokość intercepcji miały wpływ zarówno natężenie symulowanego opadu, jak i wielkość zastosowanych kropeł.

Hall i Calder (1993) wykonali badania nad wielkością intercepcji przy użyciu disdrometru laserowego i wykazali, że parametry zwilżania, określające ilość wody mogącej się zatrzymać na roślinie zależą od wielkości kropeł. Zasugerowali przy tym, że relacje pomiędzy wielkością kropeł i intensywnością deszczu powinny być szerzej badane jako ważny czynnik do obliczeń intercepcji.

Według wyników prac Caldera i in. (1996) oraz Caldera (1999) zdolność korony do zatrzymywania wody rośnie gdy maleją krople deszczu i zmniejsza się natężenie deszczu. Calder (1999) wprowadził podział na deszcz pierwszego i drugiego kontaktu z rośliną i powiązał go z piętrami w drzewostanie. W późniejszej pracy Linka i in. (2004) stwierdzono, że wielkość kropeł nie ma tak dużego wpływu na intercepcję drugiego piętra drzewostanu, gdyż docierają do niego tylko krople odbite od górnych gałęzi.

Calder (1999), budując modele stochastyczne, starał się wyjaśnić straty na intercepcję w skali globalnej. W strefie klimatu umiarkowanego intercepcja w lasach iglastych jest bardzo wysoka z powodu małych kropeł deszczu i stosunkowo niskiej intensywności opadów. W lasach tropikalnych, gdzie występują intensywne deszcze charakteryzujące się większymi kroplami, intercepcja jest niska z powodu mało efektywnego zwilżania powierzchni roślin. Przyczynia się też do tego różnica w wielkości liści w porównywanych lasach, generalnie większa w lasach tropikalnych. Pei i in. (1993) wykonali w laboratorium doświadczenia na drzewie sosnowym o wysokości około 4 m i rzucie korony 4,21 m<sup>2</sup>. Natężenie deszczu zmieniano dziesięć razy od 47,4 do 147,6 mm/h. Natężenie było sterowane komputerowo. Doświadczenie pozwoliło ustalić, że im większe natężenie deszczu, tym mniej wody zostaje na powierzchni rośliny i szybciej dochodzi do maksymalnej ilości zatrzymanej wody. Zakres natężenia w badaniach Caldera (1996, 1999) oraz Pei i in. (1993) nie przystawał do warunków strefy umiarkowanej. Prezentowane w tej pracy natężenie, czyli od 5 do 25 mm<sup>-1</sup>, jest bardziej dostosowane do możliwego do wystąpienia w Polsce. Niemniej jednak zauważalne są te same zależności wpływu natężenia deszczu i wielkości jego kropeł.

Odwrotne zależności obserwował Keim i inni (2006). Przeprowadzili w laboratorium doświadczenie na gałęziach dziewięciu różnych gatunków drzew. Do wytwarzania deszczu użyto zraszacza, dającego możliwość regulowania natężenia od 20 do 420 mm<sup>-1</sup> oraz



wielkości kropel od 1 do 2,8 mm. Wyniki pomiarów wykazały, że wraz ze wzrostem natężenia symulowanego deszczu rosło zatrzymywanie wody na gałęziach wszystkich gatunków, przy czym iglaste zatrzymały jej więcej niż liściaste przy tym samym współczynniku pokrycia liściowego (ang. leaf area index) *LAI*. Powierzchnia liści okazała się bardziej przydatnym ekwiwalentem możliwości zatrzymywania wody niż biomasa. Autorzy sugerują także potrzebę dalszych badań przy zastosowaniu niższych wartości natężenia deszczu.

Czas potrzebny do osiągnięcia potencjalnie najwyższego wypełnienia korony wodą (*T*) (tab. 1, 2, 3) potwierdza fakt, że intercepcja nie jest wartością stałą. Zmienia się wyraźnie przy każdorazowej zmianie parametrów powierzchni rośliny i symulowanego opadu.

Osiągnięcie wyższych wartości intercepcji potencjalnej, wiążące się z zastosowaniem niższego natężenia deszczu i mniejszych kropel, wymagało też dłuższego czasu ekspozycji na deszcz. Na podstawie badań Kuczy (2007) nad retencyjnymi właściwościami materii organicznej nasuwa się pytanie, jak na czas (*T*) w badaniach nad intercepcją drzew może wpływać początkowe zwilżenie powierzchni drzewa. Wydaje się to istotnym determinanem zarówno czasu (*T*), jak i samej intercepcji potencjalnej, ale niemożliwym do przeanalizowania na makietach wykonanych z tworzywa sztucznego.

Konieczne jest wykonanie podobnych analiz na żywych drzewach głównych gatunków lasotwórczych pod kątem weryfikacji przedstawionych wniosków.

Intercepcja nabiera coraz większego znaczenia w badaniach hydrologicznych, zwłaszcza po wprowadzeniu laserowych urządzeń pomiarowych, dających szerokie możliwości śledzenia procesu tworzenia się i transportu kropel wody w powietrzu.

## 5. Wnioski

Ilość wody zatrzymanej przez rośliny zależy, oprócz wielkości powierzchni, ewentualnego wpływu cech gatunkowych czy stanu powierzchni, od charakterystyk opadu deszczu. Większa ilość wody z opadu może zostać zmagazynowana w koronie drzew przy niskich natężeniach deszczu i mniejszych kropelach deszczu.

Maksymalna pojemność wodna korony drzew nie jest wartością stałą nawet w obrębie jednej testowanej makiety drzewa. Zmienia się każdorazowo pod wpływem charakterystyk opadu deszczu.

## Podziękowania

Praca zrealizowana dzięki wsparciu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu pro-

motorskiego Nr N N309298234. Dziękuję recenzentom za bardzo cenne uwagi.

## Literatura

- Asdak C., Jarvis P. G., Gardingen P. V. 1998. Evaporation of intercepted precipitation based on an energy balance in unlogged and logged forest areas of central Kalimantan, Indonesia. *Agricultural and Forest Meteorology* 92: 173–180.
- Aston A. R. 1979. Rainfall interception by eight small trees. *Journal of Hydrology* 42: 383–396.
- Barbier S., Balandier P., Gosselin F. 2009. Influence of several tree traits on rainfall partitioning in temperate and boreal forests: a review. *Annals of Forest Science* 66(6): 1–11. DOI: 10.1051/forest/2009041.
- Bryant M. L., Bhat S., Jacobs J. M. 2005. Measurements and modeling of throughfall variability for five forest communities in the southeastern US. *Journal of Hydrology* 312: 95–108. DOI:10.1016/j.jhydrol.2005.02.012.
- Calder I. R. 1999. Dependence of rainfall interception on drop size - a reply to the comment by Uijlenhoet and Stricker. *Journal of Hydrology* 217: 164–165. DOI: 10.1016/S0022-1694(99)00003-7.
- Calder I. R. 2001. Canopy processes: implications for transpiration, interception and splash induced erosion, ultimately for forest management and water resources. *Plant Ecology* 153: 203–214. DOI: 10.1007/978-94-017-3606-0\_16.
- Calder I. R., Hall R. L., Rosier P. T. W., Bastable H. G., Prasanna K. T. 1996. Dependence of rainfall interception on drops size: 2. Experimental determination of the wetting functions and two-layer stochastic model parameters for five tropical tree species. *Journal of Hydrology* 185: 379–388. DOI: 10.1016/0022-1694(95)02999-0.
- Chang M. 2003. *Forest Hydrology: an introduction to water and forest*. Boca Raton, London, New York Washington, D.C. CRC Press. ISBN 143987994X.
- Crockford R. H., Richardson D. P. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes* 14: 2903–2920. DOI: 10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17d::AID-HYP1263.0.CO;2-6.
- Feliksik E., Durło G., Wilczyński S. 1996. The interception of rainfall in mixed forest stands. *Zeszyty Naukowe AR Kraków* 5: 15–22.
- Garcia-Estringana P., Alonso-Blazquez N., Alegre J. 2010. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs. *Journal of Hydrology* 389: 363–372. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.06.017.
- Gomez J. A., Giraldez J. V., Fereres E. 2001. Rainfall interception by Olive trees in relation to leaf area. *Applied Water Management* 49: 65–76. DOI: 10.1016/j.agwat.2006.05.011.
- Hall R. L., Calder I. R. 1993. Drop size modification by forest canopies-measurements using a disdrometer. *Journal of Geophysical Research* 90: 465–470. DOI: 10.1029/93JD01498.
- Hormann G., Branding A., Clemen T., Herbst M., Hinrichs A., Thamm F. 1996. Calculation and simulation of wind

- controlled canopy interception of a beech forest in Northern Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 79 (3): 131–148.
- Jetten V. G., 1996. Interception of tropical rain forest, performance of a canopy water balance model. *Hydrological Processes*, 10: 671–685. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199605)10:5::AID-HYP3103.0.CO;2-A.
- Jong de S. M., Jetten V. G. 2007. Estimating spatial patterns of rainfall interception from remotely sensed vegetation indices and spectral mixture analysis. *International Journal of Geographical Information Science* 21(5): 529–545. DOI: 10.1080/13658810601064884.
- Keim R. F., Skaugset A. E., Weiler M. 2006. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity. *Advances in Water Resources* 29: 974–986. DOI: 10.1016/j.advwatres.2005.07.017.
- Klamerus-Iwan A., Owsiak K. 2013. Ocena konstrukcji prototypowego stanowiska do badań nad intercepcją drzew leśnych w warunkach laboratoryjnych. *Sylwan* 157(6): 464–469.
- Klamerus-Iwan A., Owsiak K., Szczuka M. 2013a. Zmodyfikowana metodyka badania intercepcji drzew w warunkach laboratoryjnych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 4(1): 45–57.
- Kuczka J. 2007. Właściwości hydrologiczne materii organicznej gleb leśnych na przykładzie gleb pod świerczynami istebniańskimi. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. Hugona Kollątaja w Krakowie* 442. Rozprawy 320: 1–176.
- Link T. E., Unsworth M., Marks D. 2004. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* 124(3-4): 171–191. DOI: 10.1016/j.agrformet.2004.01.010.
- Loescher H. W., Powers J. S., Oberbauer S. F. 2002. Spatial variation of throughfall volume in an old growth tropical rain forest. *Journal of Tropical Ecology* 18(3): 397–407.
- Okoński B., Miler A.T. 2006. Klimatyczny bilans wodny terenów zalesionych Wielkopolski na przykładzie Puszczy Zielonka. *Acta Scientiarum Polonorum, Ser. Formatio Circumiectionis* 5(2): 73–81. ISBN 978-83-89263-24-7.
- Olszewski J. 1965. Pomiary opadu deszczu w grądzie w Białowieskim Parku Narodowym. *Sylwan* 109(3): 27–32.
- Olszewski J. 1984. Intercepcja i jej wpływ na wysokość opadów atmosferycznych docierających do powierzchni gruntu w lesie. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 288: 245–270.
- Olszewski J., Orzeł W. 1975. Intercepcja opadowa buka i sosny w Bieszczadach. *Sylwan* 10: 45–53.
- Owsiak K., Klamerus-Iwan A., Kostrzewa E. 2012. Wybrane cechy morfologiczne igieł i pędów sosny zwyczajnej w kontekście obliczania potencjalnej intercepcji pojedynczych drzew. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 3(4): 203–213.
- Pei T. F., Fan S. X., Han S. W. 1993. Simulation experiment analysis on rainfall distribution process in forest canopy. *Chinese Journal of Applied Ecology* 4: 250–255.
- Pike R. G., Scherer R. 2003. Overview of the Potential Effects of Forest Management on Low Flows in Snowmelt-dominated Hydrologic Regimes. *BC Journal of Ecosystems and Management* 3(1): 44–60.
- Suliński J. 1993. Modelowanie bilansu wodnego w wymianie między atmosferą, drzewostanem i gruntem przy użyciu kryteriów ekologicznych. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. Hugona Kollątaja w Krakowie*, Rozprawa habilitacyjna, 179, s 134.
- Suliński J., Starzak R., Kuczka J. 2001. Weryfikacja wzoru wyrażającego intercepcję drzew w zależności od natężenia i czasu trwania opadu deszczu, w warunkach eksperymentalnych. *Acta Agraria et Silvicultura* 39: 3–16.
- Toba T., Ohta T. 2008. Factors affecting rainfall interception determined by a forest simulator and numerical model. *Hydrological Processes* 22(14): 2634–2643. DOI: 10.1002/hyp.6859.
- Webb E. K. 1975. The interception process, in: Prediction in Catchment Hydrology (eds. T.G. Chapman, R.X. Dunin), Netley, Australian Academy of Science: 203–236.
- Zinke P. J. 1967. Forest interception studies in the United States, in: International Symposium on Forest Hydrology (eds. W. E. Sopper, H. W. Hull). Pergamon, Oxford.
- Xiao Q.-F., McPherson E.G., Ustin S.L., Grismer M.E. 2000. A new approach to modeling tree rainfall interception. *Journal Geophysical Research* 105(ND23): 29173–29188.