

Różne spojrzenia na proces intercepcji drzew i jego determinanty

Different views on tree interception process and its determinants

Anna Klamerus-Iwan

Uniwersytet Rolniczy, Wydział Leśny, Katedra Inżynierii Leśnej, Al. 29 Listopada 46, 31–425 Kraków, Poland;

Tel. +48 12 662 53 56; e-mail: annaklamerus.iwan@gmail.com

Abstract. The subject of the study is the process of interception by plants defined as the process of retaining rainfall water on plant surface, counting retention by individual plant parts or the vegetation cover as the whole. In the quantitative approach, interception capability of plants may be compared to a reservoir, the capacity of which is determined mostly by the surface of plants. Among many approaches to describe interception processes, a lot of attention has been focused on research concerning the forest vegetation with reference to atmosphere – forest stand – soil balance. Hence, in the present paper interception issues are addressed in view of forest ecosystems. The emphasis is also put on the methods and results of studies carried out under laboratory conditions. .

Up-to-date literature on interception is abundant. The authors tackling this issue regularly define their own variable and complex sets of terms. This paper is an attempt to review and organize knowledge presented in existing literature on the subject.

Key words: forest water balance, canopy storage capacity, rainfall intensity, size of raindrops

1. Wprowadzenie

W zagadnieniach hydrologicznych intercepcja roślin jest rozważana zasadniczo w dwóch aspektach: jako składowa bilansu wodnego zlewni hydrologicznej lub jako składowa przepływu wody w systemie ‘atmosfera – drzewostan – gleba’. Niezależnie jednak od konieczności porządkowania pojęć, metod i wyników badań, należy podkreślić, iż intercepcja jest ważnym czynnikiem bilansu wodnego lasu, który z kolei ma wszechstronny wpływ na mikroklimat związany z wilgotnością powietrza, o czym pisze na przykład Aussenag (2000).

W hydrologii dynamicznej pojęciem intercepcji określa się procesy zachodzące na całym obszarze zlewni, w dłuższym okresie obejmującym opady deszczu i występujące między nimi okresy parowania z powierzchni roślin. Obszerne studium na ten temat przedstawił Osuch (1994). Problematyka intercepcji jest także

przedmiotem rozważań w podręcznikach, między innymi Soczyńskiej (1997), Gutry-Koryckiej i in. (2003). Intercepcję w ujęciu całej zlewni można szacować na podstawie hydrogramu odpływu dla profilu zamykającego zlewnię. Składowe bilansu wodnego zlewni wyodrębnione na podstawie hydrogramu odpływu są wartościami średnimi dla zlewni, toteż niejako z definicji obliczona intercepcja nie może być utożsamiona z intercepcją roślinności w ekosystemach leśnych. Jest to jedna z głównych przeszkód w pełnej ocenie roli lasu dla bilansu wodnego zlewni, podobnie jak zróżnicowanie intercepcji. Dlatego między innymi wiedza o tym, w jaki sposób warunki siedliskowe oraz cechy taksacyjne drzewostanów zmieniające się z upływem wieku zarówno w sposób naturalny, jak i modulowane przez zabiegi hodowlane, czynniki biotyczne i abiotyczne, kształtują odpływ wody z lasu przy zmieniającej się intercepcji pozostaje nadal hipotetyczna (Miler 2008). Brak jest

konkretnych parametrów i wzorów ujmujących te zagadnienia w sposób liczbowy. Znaczącą próbą wyeliminowania tej luki jest opracowanie i doskonalenie metodyki wprowadzenia informacji o warunkach siedliskowych i drzewostanowych, dostępnych w operacie urzędziowym, do obliczania parametru charakteryzującego warunki fizjograficzne w modelach matematycznych opisujących opad efektywny (Sol Conservation Service – SCS) (Grajewski 2006; Okoński 2007). W niniejszym artykule związek intercepcji roślinności leśnej z opadem efektywnym został pominięty.

W kontekście bilansu wodnego Suliński (1995) wymienia cztery główne cechy odróżniające ekosystem leśny od uprawy rolniczej: przynależność do wyższego poziomu organizacji życia, możliwość całkowitego wypełnienia biomasą przestrzeni zajmowanej przez rośliny, silne zróżnicowanie gęstości objętościowej poszczególnych organów roślin oraz całoroczne, wielowarstwowe osłonięcie gruntu. Różnice te są prawdopodobnie przyczyną, że metodyka i wyniki badań nad intercepcją roślin uprawnych, ani też stosowane formuły matematyczne (Orzeł 1980; Kowalik 1995; Kołodziej et al. 2005) nie znajdują w pełni zastosowania do zbiorowisk leśnych.

W badaniach ekosystemów leśnych bardzo często rozdziela się intercepcję na poszczególne rodzaje powierzchni, listowia, gałęzi i pni, a nawet jeszcze bardziej szczegółowo wyodrębnione części roślin (Brechtel 1990). Różne są tego powody, zazwyczaj chodzi o osiągnięcie określonego celu, chociażby umożliwienia obliczenia stężenia mokrego opadu zanieczyszczeń, ale są to także badania ukierunkowane na poznanie zróżnicowania intercepcji jako procesu fizycznego. Dla przykładu można wymienić badania intercepcji dolnego piętra lasu prowadzone przez Nachorecką-Dudę i Ratomską (2002), badania Linka i innych (2004) z rozdziałem intercepcji na piętra i warstwy w drzewostanie, czy też badania Caldera (1999) oraz Jonga i Jettena (2007), którzy również podkreślali znaczenie piętrowości drzewostanu. Calder (1999) wpływ piętrowości drzewostanu połączył dodatkowo z faktem, że krople deszczu docierające do niższych warstw lasu mają mniejszą energię kinetyczną i rozmiary. Są także prace, w których możliwości intercepcyjne drzewostanu analizowano w zależności od jego zwarcia (Głogowska i Olszewski 1967; Gash et al. 1995).

Wiele jest możliwości ujęcia intercepcji w równaniach opisujących wymianę wody w systemie 'atmosfera – drzewostan – gleba'. W zdecydowanej większości używane są równania, w których okres przyrostu zapasu wody w glebie jest traktowany wspólnie z okresem jej ubytku. Wówczas intercepcja jest niejako ukryta w ewapotranspiracji. Dla przykładu można tu wymienić równania Benecke (1976). Suliński rozdziela fazę przy-

rostu zapasu wodu i fazę jej ubytku, a intercepcję ujmuje bezpośrednio jako składową równania dla fazy zasilania wody glebowej (Suliński 1993).

$$Z_p = P - [(I_d + I_r + I_s) + \Delta'q_s + \Delta'q_i + \Delta'q_g] \quad (1)$$

gdzie: Z_p – przyrost zapasu wody w gruncie; P – opad nad koronami drzew; I – intercepcja: d – drzew, r – runa, s – ściółki; $\Delta'q$ – odpływ wody z poletka stokowego w czasie trwania fazy zasilania: s – powierzchniowy; i – śródpokrywowy; g – gruntem.

W tym ujęciu intercepcja może być wyliczona jako różnica między pojedynczym opadem deszczu a przyrostem zapasu wody w glebie, szczególnie w glebach przepuszczalnych, ze swobodnym zwierciadłem wody gruntowej w zasięgu systemów korzeniowych roślin. W bilansie wodnym intercepcja należy do fazy zasilania gleby w wodę i pomniejsza ilość wody docierającą do gleby. Przydatność tak skonstruowanych równań potwierdzają prace Sulińskiego i Owsiaaka (2009) oraz Sulińskiego i Starzaka (2009).

Intercepcja jest znaczącą liczbowo składową bilansu wodnego. Pike i Scherer (2003) wyrazili nawet pogląd, że jest kluczowym problemem hydrologii leśnej. Na możliwość zatrzymywania opadu deszczu w granicach 10–30% wskazywali już Zinke (1967) i Blake (1975), którzy za warunki istotne przy pomiarze intercepcji uznali wilgotność powietrza i zwarcie drzewostanu. Calder (1999) podał wartość intercepcji nawet rzędu 50%.

Niezależnie od różnic składu gatunkowego, struktury i gęstości lasu, ani też różnic charakterystyk deszczu związanych z odmiennymi warunkami klimatycznymi, intercepcja powinna być uwzględniana w modelach symulujących takie procesy jak ewapotranspiracja, odpływ wody z gleby, retencja gruntowa (Chang 2003) lub też w bilansach wodnych o specjalnym przeznaczeniu, na przykład w badaniach geochemicznych (Hörman et al. 1996) lub badaniach obiegu azotu w atmosferze (Loesch et al. 2002).

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 prace Ostrowskiego (1965) i Olszewskiego (1965, 1984). Próbę zestawienia wielkości intercepcji uzyskanych w lokalnych obserwacjach podjęli na przykład Pei i inni (1993). Większość badaczy wyznaczała intercepcję drzew jako różnicę opadu nad i pod koronami drzew (Olszewski 1984; Aston 1979; Jetten 1994; Feliksik et al. 1996; Calder 2001; Gomez et al. 2001; Bryant et al. 2005; Pypker 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 (Crockford i Richardson 2000; Jong i Jetten 2007).

2. Czynniki wpływające na proces intercepcji

W świetle wiedzy o procesie zwilżania różnych powierzchni, nie tylko materiału roślinnego, i zatrzymywania na nich wody (Stankiewicz 1971) należy założyć, iż przy badaniu intercepcji konieczne jest uwzględnienie stanu zraszanej powierzchni.

Powszechnie przyjmuje się, że wielkość intercepcji pozostaje w bezpośrednim związku z wielkością powierzchni nadziemnej części rośliny. W starszych pracach powierzchnię drzew starano się charakteryzować za pomocą jej podobieństwa do innych cech biometrycznych drzewa lub drzewostanu, na przykład Czarnowski (1978), czy Teklehaimanot i Jarvis (1991), którzy przyjęli liniową zależność intercepcji od liczby drzew na hektarze.

Współcześnie, w większości badań intercepcji drzewostanów, koronę drzew charakteryzuje się wskaźnikiem pokrycia liściowego (ang. leaf area index) *LAI* (Harrison 1993; Hurcom et Harrison 1998). Jest to związane z rozwojem metod i urządzeń do jego obliczania. Zdolność do zatrzymywania wody przez korony drzew z wartością *LAI* wiązali między innymi Klaassen i inni (1996). Są oni zdania, że korona drzewa, jej budowa i wielkość warunkuje, jaki procent całego opadu nie dociera do gleby. Relacje między *LAI* a intercepcją w różnych rodzajach drzewostanów stwierdzili na przykład Gomez i inni (2001), Hall (2003), a także Jong i Epema (2001). Ci ostatni autorzy dodatkowo wskazują na możliwość określania rozkładu *LAI* w koronach drzew metodą analizy spektralnego zmieszania (ang. spectral mixture analysis) zdjęć. Znaczenie rozkładu wartości *LAI* było analizowane w późniejszej pracy Jonga z Jettenem (2007). Podkreślono w niej, że relacje pomiędzy zdolnością zatrzymywania wody przez rośliny a *LAI* są zbadane tylko w przypadku niektórych gatunków i typów roślinności, ale nie w przypadku koron drzew ze względu na zbyt małą liczbę danych.

Llorens i Gallart (2000) zaproponowali uproszczone metody mierzenia zdolności korony do zatrzymywania deszczu, ale Bryant i inni (2005) wskazali, że poprawna interpretacja danych o wielkości intercepcji wymaga pełnej charakterystyki parametrów korony drzew w powiązaniu z uwarunkowaniami klimatycznymi.

Rozwój modeli matematycznych opisujących transformację opadu w odpływ, w których poszczególne rodzaje retencji traktuje się jako system zbiorników, wymusił traktowanie intercepcji roślin jako swoistego rodzaju zbiornika o określonej pojemności. Próbę okreś-

lenia pojemności wodnej zbiornika intercepcyjnego sosny zwyczajnej podjęli Osuch i inni (2005, 2005a). Autorzy ci rozdzielnie obliczali powierzchnię listowia i kory drzewa, ewentualnie z podziałem przekroju pionowego drzewa na sekcje. Powierzchnię zieloną potraktowali jako jednolity płat, na którym retencionowana jest woda na górnej i dolnej stronie. Rozróżnili powierzchnię kory pędów młodych i starszych, które mają większą zdolność do gromadzenia wody. Zauważyli, że pod koniec okresu wegetacyjnego, kiedy zaczyna się proces defoliacji, przylepność deszczowa liści jest większa. Zwrócili uwagę na trudność przeliczenia danych uzyskanych na wybranych drzewach dla całego drzewostanu na określonej powierzchni.

Wielkość powierzchni roślin zatrzymujących opad jest w świetle współczesnej wiedzy dominującym, lecz nie jedynym czynnikiem określającym intercepcję roślin. Na zdolność gromadzenia wody mogą mieć wpływ jeszcze inne czynniki związane ze stanem powierzchni. Oddzielne zbadanie wszystkich czynników, które - z teoretycznego punktu widzenia - należałoby ująć, w praktyce jest bardzo trudne.

Niektóre opinie dotyczące wpływu cech gatunkowych na zdolność zatrzymywania wody mają charakter bardziej hipotetyczny, niż twierdzeń opartych na wynikach badań. Na przykład głoszony jest pogląd, że lasy iglaste przepuszczają przez swe korony mniej wody deszczowej niż lasy liściaste. Uzasadnia się to między innymi tym, że po powierzchni liści zwilżonych woda stosunkowo łatwo spływa, natomiast na końcach igieł zatrzymuje się w postaci kropel. Zagadnienie jest tym trudniejsze do pogłębienia, że po pojedynczym opadzie deszczu intercepcja jest stosunkowo mała. Na przykład Rutter i inni (1975) określili możliwości saturacyjne koron drzew liściastych (grab zwyczajny i dąb czerwony) i iglastych (dąglezja zielona, świerk pospolity i sosna czarna) na 0,5–2 mm. Trzeba zatem uznać, że Keimem (2004), że zdolność korony do zatrzymywania wody można traktować jako wartość stałą tylko dla pojedynczego opadu deszczu, kolejne opady mogą tę zdolność modulować.

Crockford i Richardson (2000) uznali zdolność korony do zatrzymywania wody za kluczową cechę gatunkową wpływającą na wielkość intercepcji. Natomiast Bryant i inni (2005), po przeanalizowaniu strat na intercepcję w drzewostanach różniących się składem gatunkowym, wyciągnęli wniosek, że straty te są bardzo podobne.

Osuch (1994) i Osuch i in. (2005) zwracali uwagę, że zdolność powierzchni rośliny do zatrzymywania wody zmienia się w zależności od pory roku. Podobną zmienność sezonową zaobserwowali Zeng i inni (2000). Obecnie brak dostatecznych przesłanek, czy należy to w większym stopniu wiązać z temperaturą deszczu, zmie-

niającą się wraz z porą roku, czy też z cechami fizycznymi listowia, również zmieniającymi się wraz z czasem. Temperatura deszczu i temperatura powierzchni listowia – z teoretycznego punktu widzenia – powinny być czynnikami mającymi istotne znaczenie dla przylepności deszczowej. Tym bardziej, że temperatura wody deszczowej znacznie wpływa na rozmiar kropeł deszczu (Owsiak et al. 2013).

Do czynników mających wpływ na wielkość intercepcji zaliczany jest również stopień zabrudzenia powierzchni roślin, zmieniający się w okresie wegetacji (Jong i Jetten 2007). Dodać można, że jest to również obecność lub brak wosku pokrywającego kutykulę właściwą, co jest związane z naturalnymi cechami gatunkowymi, lecz również ewentualnym oddziaływaniem obecnych w powietrzu zanieczyszczeń (Gruszka 1991).

Ilość wody zatrzymywanej przez rośliny zależy, nie tylko od wielkości powierzchni roślin, jej cech gatunkowych i stanu, ale także od charakterystyk opadu deszczu. W piśmiennictwie podkreśla się dwa główne czynniki – natężenie deszczu oraz wielkość spadających kropli.

Schulze i inni (1978) wykonali analizę regresyjną strat intercepcyjnych w zależności od czasu trwania opadu deszczu. Natężenie deszczu zestawili w czterech przedziałach: 0,0–1,4; 1,5–2,9; 3,0–5,9; 6,0 mm/h. Analiza wykazała, że intercepcja wzrasta wraz ze wzrostem natężenia deszczu, kiedy czas trwania deszczu jest odpowiednio długi. Podobne spostrzeżenia podali Hattori i inni (1982). Szereg autorów, np. Yulianur i inni (1998), Yoshida i inni (1993), Hashino i inni (2002), określiło intercepcję jako wartość średnią w ciągu godziny dla deszczu z uśrednionym natężeniem i potwierdziło silną korelację między tymi wielkościami.

Suliński (1993) w celu weryfikacji wzoru Czarnowskiego na intercepcję drzewostanu (por. wzór 4; Czarnowski i Olszewski 1968; Czarnowski 1978) analizował 117 przypadków intercepcji zaczerpniętych z piśmiennictwa i stwierdził, iż ilość wody pozostająca na drzewach jest proporcjonalna do wielkości powierzchni tych drzew. Zwrócił też uwagę na fakt, że o wielkości intercepcji decyduje nie tyle sama wielkość opadu, lecz jego natężenie.

Powierzchnia roślin zapełnia się wodą początkowo szybko, potem coraz wolniej aż do osiągnięcia wartości maksymalnej. Osuch (1998) wiązał to zjawisko z natężeniem opadu i wskaźnikiem gęstości roślin. Wpływ natężenia deszczu na wielkość intercepcji nie zawsze ma charakter liniowy. Zależy to od wartości natężenia deszczu (Lorens et al. 1997; Caryle-Moses 2004).

Tsukamoto i inni (1988) mierzyli 1-godzinne wartości intercepcji drzew przy małym natężeniu deszczu i stwierdzili, że wielkość intercepcji była proporcjonalna do natężenia deszczu tylko w przedziale do 7,0 mm/h. Toba i Ohta (2008) także stwierdzili, że przyrost inter-

cepcji maleje wykładniczo wraz ze wzrostem natężenia opadu. W przypadku małych opadów intercepcja była bardzo zróżnicowana, często nie przekraczała poziomu 0,2 mm.

Rola natężenia deszczu w kształtowaniu wielkości intercepcji roślin jest bardzo istotna, lecz zagadnienia te są słabo poznane, dlatego Asdak i inni (1998), a także Toba i Ohta (2008) postulują potrzebę rozwinięcia prac tym kierunku.

Rozważania dotyczące fizycznych aspektów formowania się kropli deszczu oraz ich przylegania do powierzchni roślin, stanowiące punkt wyjścia do bardziej podbudowanych teoretycznie rozważań procesu intercepcji, były przedmiotem zainteresowania od dawna. Na przykład rozważano znaczenie rozmiaru kropeł deszczu dla wielkości siły, z jaką uderzają one w powierzchnię ziemi i roślin (Chapman 1948). Wpływ charakterystyk opadu deszczu na ilość wody zatrzymanej na roślinach opisywał Robin (2003). Niewątpliwie jednak badania dotyczące opadów były dotychczas domeną głównie meteorologii. Obecnie nabierają coraz większego znaczenia w badaniach hydrologicznych, zwłaszcza po wprowadzeniu laserowych urządzeń pomiarowych, dających możliwość śledzenia procesu tworzenia się i transportu kropli wody w powietrzu.

Hall i Calder (1993) wykonali doświadczenia z symulatorem deszczu i posługując się disdrometrem laserowym wykazali, że parametry zwilżania, określające, ile wody może się zatrzymać na roślinie, zależą od wielkości kropeł i liczby kropeł powstałych w wyniku podziału na mniejsze podczas odbijania się od powierzchni. Zasugerowali, że relacje pomiędzy wielkością kropeł i intensywnością deszczu – jako ważny czynnik dla obliczeń intercepcji – powinny być szerzej zbadane.

Torres i inni (1994) przedstawili zależności między wielkością kropeł a natężeniem deszczu. Obserwowali zmiany parametrów deszczu w czasie jego trwania. Uijlenhoet i Stricker (1999) uważają, że zależność pomiędzy wielkością kropeł i intensywnością deszczu a intercepcją jest większa, niż przypuszczano do tej pory, ale ich stanowiska nie podziela Calder (1999).

Według wyników prac Caldera i innych (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 drzew w drzewostanie. Link i inni (2004) stwierdzili, 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) starał się wyjaśnić straty na intercepcję w skali globalnej, budując modele stochastyczne. W strefie klimatu umiarkowanego intercepcja w lasach

iglastych jest bardzo duża z powodu małych kropeł deszczu i stosunkowo niskiej intensywności opadów. W lasach tropikalnych, gdzie występują intensywne deszcze charakteryzujące się większymi kroplami, intercepcja jest mała z powodu mało efektywnego zwilżania powierzchni roślin, co jest związane z wielkością liści. W lasach tropikalnych liście są na ogół większe.

3. Wybrane wzory do opisywania intercepcji drzew

Wzory matematyczne opisujące wielkość intercepcji roślinności leśnej można w bardzo ogólnym ujęciu podzielić na dwie grupy: 1) oparte na przesłankach fizycznych procesu zatrzymywania wody przez korony drzew (Rutter 1971; Gash 1979) i ich modyfikacje (Massman 1983; Mulder 1985; Liu 1988, 1992), oraz 2) wzory regresyjne o charakterze czysto formalnym lub podbudowane przesłankami przyrodniczymi (Horton 1919; Merriam 1960; Leonard 1965; Czarnowski i Olszewski 1968; Czarnowski 1978; Aston 1979; Massman 1980; Calder 1986; Suliński 1993).

Wzory zaliczone do pierwszej grupy oparte są na przesłankach odnoszących się do wyliczeń bilansu wodnego powierzchni drzew. Przykładem są prace Ruttera i innych (1971, 1975, 1977), w wyniku których została ustalona postać wzoru na zmiany pojemności wodnej korony w czasie opadu (Rutter i Morton 1977):

$$\frac{dC}{dt} = (1-p)R - E - k(e^{hC} - 1) \quad (2)$$

We wzorach należących do drugiej grupy uwzględnia się znany z pomiarów fakt, że intercepcja wzrasta tylko do pewnej granicy całkowitej wielkości opadu deszczu.

Seppänen w 1963 roku (za Leonardem 1967) zaproponował następujący wzór na wielkość intercepcji:

$$i_{dk} = (X_1 + X_2 E_t) (1 - e^{-cP}) \quad (3)$$

gdzie: i_{dk} – intercepcja koron drzew; X_1 , X_2 – miary charakteryzujące wielkość i stan wilgotności powierzchni liści; E_t – parowanie z powierzchni liści w czasie t ; P – wielkość opadu deszczu nad koronami drzew w czasie t ; c – współczynnik proporcjonalności.

Przytoczona postać wzoru (3) była wielokrotnie modyfikowana w celu dostosowania do specyficznych badań (Liu 1997).

Czarnowski i Olszewski (1968) zbudowali podobny wzór wyrażający intercepcję drzewostanu. Wzór ten przytoczono wraz z wartościami współczynników obliczonymi dla drzewostanu grabowego:

$$i = i_m (1 - e^{-\alpha P}) = 10,1 (1 - e^{-0,06P}) \quad (4)$$

gdzie: i – intercepcja, P – opad nad koronami drzew; i_m – maksymalnie możliwa intercepcja, gdy $P \rightarrow \infty$; α – stała dla gatunku;

Uogólnioną postać wzoru (4) Czarnowski (1978) zamieścił w pierwszym wydaniu podręcznika do ekologii roślin. Nową ideą tego wzoru jest wprowadzenie pojęcia intercepcji maksymalnej, która zależy od wielkości powierzchni roślin i charakterystyki nazwanej „przylepnością deszczową”.

W wyniku weryfikacji wzoru (4) Suliński (1993) zaproponował jego modyfikację do postaci:

$$i_d = \left[\beta i_{0d} \left(0,157 \sum_{j=1}^n D_j H_j N_j \right) \right] \left[(1 - e^{-\phi s}) (1 - e^{-\gamma t}) \right] \quad (5)$$

gdzie: i_d – intercepcja drzew (mm); i_{0d} – intercepcja początkowa (mm); D_j , H_j , N_j – średnie wartości pierśnicy (cm) i wysokości (m) drzew oraz liczba drzew (tys. szt./ha) gatunku j ; s – natężenie pojedynczego opadu deszczu (mm/h); t – czas trwania pojedynczego opadu (godz.); β – charakterystyka stanu powierzchni (przylepność deszczowa), ϕ , γ – parametry skalujące (do wyliczenia w procesie identyfikacji wzoru).

Z tego wzoru wynika, że proces intercepcji można porównać do napełniania nieszczelnego zbiornika o objętości nazwanej intercepcją potencjalną, którego napełnienie po pojedynczym opadzie deszczu zależy od natężenia i czasu trwania tego deszczu.

Innym przykładem poszukiwań funkcji opisującej wpływ charakterystyk deszczu na kształtowanie się intercepcji może być wzór Astona (1979):

$$I = C_p S_{\max} \left(1 - e^{-\frac{kP}{S_{\max}}} \right) \quad (6)$$

gdzie: I – intercepcja koron drzew; C_p – funkcja pokrycia korony; S_{\max} – maksymalna pojemność wodna korony (mm); k – współczynnik charakteryzujący koronę drzew; P – wysokość opadu deszczu.

Wpływ wielkości opadu deszczu na kształtowanie się intercepcji w tym wzorze wyrażono według funkcji Mitscherlicha, modulując jednak współczynnik skalujący zmiennej P do postaci k/S_{\max} . Autor wzoru podaje, że wartość k każdej gęstej i zamkniętej korony, choć teoretycznie równa jest jedności, to w rzeczywistości zależy od LAI , struktury korony, natężenia deszczu i siły wiatru. W ten sposób człon ujęty w nawiasie ma szersze zadanie, niż tylko charakteryzowanie deszczu.

4. Badania intercepcji w warunkach laboratoryjnych

Polowe, bezpośrednie pomiary intercepcji drzew i roślinności runa leśnego są trudne pod względem metodycznym i organizacyjnym, mimo wprowadzenia na szerszą skalę urządzeń radarowych i laserowych umożliwiających śledzenie przemieszczania się kropeł wody przez warstwę roślin. Dlatego ilościowe ujęcia intercepcji nie zapewniają wymaganej precyzji i uogólnień potrzebnych w badaniach hydrologicznych. Drogą do pogłębienia wiedzy o czynnikach kształtujących intercepcję zbiorowisk leśnych są więc nadal badania w warunkach kontrolowanych (Anzhini et al. 2007), które mogą dostarczyć danych do identyfikacji modeli matematycznych zbudowanych przy użyciu kryteriów ekologicznych (Czarnowski 1978; Suliński et al. 2001).

Badania intercepcji w warunkach kontrolowanych są wykonywane w odniesieniu do pojedynczych drzew, zazwyczaj o wymiarach umożliwiających ustawienie ich w laboratorium, gdzie stanowiska pomiarowe pozwalają kontrolować zarówno parametry zraszanego obiektu, jak i charakterystyki symulowanego opadu deszczu. Trzeba jednakże zaznaczyć, iż przejście od intercepcji pojedynczej rośliny, lub większego nawet drzewa, do intercepcji drzewostanu nie jest oczywiste (Czarnowski 1978; Rupert 2013). Istnieje ryzyko pominięcia czynników mało istotnych w warunkach laboratoryjnych, natomiast o dużym znaczeniu w warunkach polowych. Na przykład Liu (1997) pominął rolę ewapotranspiracji w okresach między kolejnymi opadami deszczu.

Pei i inni (1993) studiowali zagadnienie przechwytywania deszczu przez korony drzew i stwierdzili, że celowe jest zbudowanie modelu procesu intercepcji opadającego, w jaki sposób zmienia się ona wraz z intensywnością deszczu i cechami korony. W tym celu, wykonali doświadczenie w warunkach umożliwiających kontrolowanie zarówno intensywności deszczu, jak i charakterystyk zraszanej powierzchni. Do doświadczenia użyli drzewko sosnowe o wysokości około 4 m i o rzucie korony 4,21 m². W trakcie doświadczenia zmniejszano powierzchnię listowia, kontrolując wskaźnik *LAI* za pomocą urządzenia *LAI 2000 Plant Canopy Analyser*. Natężenie deszczu było regulowane za pomocą urządzenia sterowanego komputerem. Doświadczenie pozwoliło ustalić, że im większe natężenie deszczu, tym mniej wody zostaje na powierzchni rośliny, a przyrost intercepcji szybciej osiąga wartość maksymalną. Autorzy wskazali ponadto potrzebę przeprowadzenia większej liczby doświadczeń, aby uzyskać informację, jaka jest maksymalna aktualna intercepcja w przeliczeniu na jednostkę powierzchni. Przedstawiając opisane badania, w kontekście warunków opadowych w Polsce, należy

zwrócić uwagę na bardzo wysokie natężenia symulowanego opadu deszczu.

Putuhena i Cordery (1996) w warunkach laboratoryjnych badali intercepcję opadniętych igieł sosnowych pod piętnastoletnim drzewostanem sosnowym oraz opadniętych liści i gałązek w lesie eukaliptusowym. Ponadto z obydwóch drzewostanów pobrali próbki roślinności runa. Intercepcję tych komponentów pokrycia gleby mierzono w warunkach symulowanego opadu deszczu. Intercepcja pokrycia gleby w drzewostanie sosnowym wynosiła 2,8 mm a w eukaliptusowym 1,7 mm. W wyniku badań stwierdzono, że zdolność intercepcyjna wszystkich komponentów pokrycia gleby leśnej była proporcjonalna do masy próbek przypadających na jednostkę powierzchni lub do grubości pokrycia, dla traw stojących – do procentowego pokrycia gleby.

Suliński i inni (2001), w celu weryfikacji współczynników ujętych we wzorze (6), przeprowadzili badania w warunkach kontrolowanych metodą jedynej różnicy (*ceteris paribus*). Badaniami objęto dwa gatunki: buka zwyczajnego i świerka pospolitego. Drzewa zraszano symulowanym opadem deszczu o natężeniu 1,22–9,72 mm/h przez 80 minut w przypadku buka i przez 100 minut w przypadku świerka. Drzewka otoczone były cylindrem ograniczającym parowanie z powierzchni drzewek w czasie zraszania. Po każdym powtórzeniu zraszania drzewka suszono na wolnym powietrzu. Intercepcję liczono jako różnicę dwóch wartości: masy wody zużytej na wytworzenie opadu i wody odciekającej spod rośliny. Pomierzone wartości intercepcji pozwoliły stwierdzić, że intercepcja rzeczywista rośnie wraz z natężeniem opadu, przyrost intercepcji podczas wszystkich powtórzeń doświadczenia osiąga wartości maksymalne w podobnym czasie od rozpoczęcia zraszania, a intercepcja świerka jest wyraźnie większa od intercepcji buka.

Klamerus-Iwan (2010) badała drzewka pięciu gatunków: dębu szypułkowego, buka zwyczajnego, sosny zwyczajnej, jodły pospolitej i świerka pospolitego, o wysokości do 1 m. Równocześnie wykonywano wszystkie czynności badawcze na dwóch makietach drzewka liściastego i iglastego wykonanych z tworzywa sztucznego, o niezmiennych właściwościach powierzchni, niezależnie od długości czasu zraszania. Intercepcję badano w warunkach laboratoryjnych przy użyciu oryginalnej metodyki, na stanowisku pomiarowym własnej konstrukcji (Klamerus-Iwan et al. 2013)

Ilość wody zatrzymanej podczas zraszania mierzono w trakcie 75 powtórzeń na drzewkach oraz 30 na makietach, z jednodominutowym odstępem czasowym. Doświadczenie dostarczyło danych świadczących o tym, że intercepcja potencjalna zależy od podstawowych charakterystyk drzew, przede wszystkim od wielkości powierzchni oraz jej właściwości sorpcyjnych, modulo-

wanych podczas trwania zraszania. Czas potrzebny do osiągnięcia intercepcji potencjalnej zależy od natężenia deszczu i wielkości kropeł.

Keim i inni (2006) przeprowadzili w laboratorium doświadczenie na gałęziach dziewięciu gatunków drzew. Końcówki gałęzi zabezpieczono parafiną i poddawano deszczowaniu przez około 6 godzin. Dla każdej gałązki określono biomasa oraz wartości *LAI*. Do wytwarzania deszczu użyto zraszacz, dający możliwość regulowania natężenia od 20 do 420 mm/h, oraz wielkości kropeł od 1 do 2,8 mm. Wraz ze wzrostem natężenia deszczu rosło zatrzymywanie wody na gałązkach wszystkich gatunków. Gatunki iglaste zatrzymały mniej wody w przeliczeniu na jednostkę biomasy, ale więcej w przeliczeniu na *LAI*. Powierzchnia liści okazała się bardziej przydatnym wskaźnikiem możliwości zatrzymywania wody niż biomasa.

Toba i Otha (2008) przeprowadzili eksperyment zmierzający do zbadania zjawiska odbijania się kropeł od powierzchni. Do eksperymentu wykorzystano drzewko jodłowe o wysokości 60 cm. Wykonano cztery powtórzenia zraszania, redukując wartości *LAI* przez obcinanie gałązek. Stwierdzono, że odbijające się krople deszczu stanowią 60% intercepcji, ilość odbitych kropeł rośnie wraz z intercepcją i nie zależy od *LAI*.

5. Podsumowanie

Podsumowując stan wiedzy w zakresie intercepcji roślin, rozpatrywanej jako proces zachodzący podczas dającego się wyodrębnić opadu deszczu można przyjąć, iż problematyka ta pozostaje w centrum uwagi hydrologów rozwiązujących bilanse wodne zlewni, jak i zajmujących się określonymi ekosystemami leśnymi. Podejścia te różnią się nie tylko ze względu na stawiane cele do osiągnięcia, lecz także metody jego badania i opisywania. We wszystkich przypadkach są to formuły empiryczne, podbudowane w różnym stopniu prawami fizyki, ale już rzadziej znajomością prawideł rządzących dynamiką wzrostu drzewostanów. Przepuszczalnie z tego powodu w bilansie wodnym zlewni bardzo dużą uwagę przywiązuje się do samego stanu powierzchni roślin, w znacznie mniejszym stopniu do charakterystyk deszczu. Pogląd ten jest często bezkrytycznie przenoszony do badań bilansu wodnego lasu. Konieczne jest zatem prowadzenie dalszych badań procesu intercepcji w warunkach laboratoryjnych, których wyniki mogłyby być wykorzystane w objaśnianiu zależności dotyczących bilansu 'atmosfera – drzewostan – gleba' na poziomie ekosystemu.

Literatura

- Anzhi W., Yiwei D., Tiefan P., Changjie J., Jiaojun Z. 2007. A semi-theoretical model of canopy rainfall interception for a broad-leaved tree. *Hydrological Processes*, 21 (18): 2458–2463.
- Aston A. R. 1979. Rainfall interception by eight small trees. *Journal of Hydrology*, 42: 383–396.
- Aussenag G. 2000. Interaction between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science*, 57: 287–301.
- Benecke P. 1976. Soil water relations and water exchange of forest ecosystems, w: Water and plant life (eds: O. L. Lange, L. Kappen, E.-D. Schulze). Berlin, Springer Verlag.
- Blake G. J. 1975. The interception process, w: T.G. Chapman and R.X. Dunin (eds), Prediction in Catchment Hydrology. Netley, Australian Academy of Science: 59–81.
- Brechtl H. 1990. Monitoring wet deposition in forest – quantitative and qualitative aspects, w: Monitoring air pollution and forest ecosystem research. Commission of the European Communities Environment and Quality of Life. Report EUR 12451, Bilthoven, The Netherlands.
- Bryant M. L., Bhat S. and Jacobs J. M. 2005. Measurements and modeling of throughfall variability for five forest communities in the southeastern US. *Journal of Hydrology*, 312: 95–108.
- 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.
- 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.
- 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.
- Carlyle-Moses D.E., Price A.G. 1999. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal of Hydrology*, 214: 103–110.
- Chang M. 2003. Forest hydrology: an introduction to water and forest. Boca Raton, CRC Press. ISBN 0-8493-1363-5.
- Chapman G. 1948. Size of raindrops and their striking force at the soil surface in a red pine plantation, *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 29: 664–670.
- 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.
- Czarnowski M. S. 1978. Zarys ekologii roślin lądowych. Warszawa, PWN.
- Czarnowski M. S., Olszewski J. L. 1968. Rainfall interception by a forest canopy. *Oikos*, 21: 48–51.
- Feliksik E., Durło G., Wilczyński S. 1996. The interception of rainfall in mixed forest stands. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie*, 5: 15–22.

- Gash J. H. C. 1979. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105: 43–55.
- Gash J. H. C., Loyd C. R., Lachaud G. 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170: 79–86.
- Głogowska J., Olszewski J. 1967. Opad deszczu w lesie liściastym. *Sylwan* 5: 55–64.
- 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
- Grajewski S. 2006. Zastosowanie analizy skupień w porównawczych badaniach zdolności retencyjnych ekosystemów leśnych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 3/1: 155–169.
- Gruszka A. 1991. Wpływ symulowanych kwaśnych deszczów na wybrane gatunki drzew leśnych. Praca doktorska wykonana w Katedrze Ekologii Lasu, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie.
- Gutry-Korycka M., Nowicka B., Soczyńska U. 2003. Rola retencji zlewni w kształtowaniu wezbrań opadowych. Warszawa, Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych.
- Hall R. L. 2003. Interception loss as a function of rainfall and forest types: stochastic modelling for tropical canopies revisited. *Journal of Hydrology*, 280: 1–12.
- Hall R. L., Calder I. R. 1993. Drop size modification by forest canopies-measurements using a disdrometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 90: 465–470.
- Harrison A., Taberner M., Hurcom S.S. 1993. Site-based remote sensing of vegetation and land cover. w: J.B. Thornes and C.J. Brandt (eds) MEDALUS I Final Report. European Community, pp. 225–263.
- Hattori S., Chikaarashi H., Takeuchi N. 1982. Measurement of the rainfall interception and its micrometeorological analysis in a Hinoiki station. *Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute (Bulletin of FFPRI)*, 318: 79–102.
- Hashino M., Yao H., Yoshida H. 2002. Studies and evaluations on interception processes during rainfall based on a tank model. *Journal of Hydrology*, 255: 1–11.
- 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.
- Horton R. E. 1919. Rainfall interception. *Monthly Weather Review* 47: 603–623.
- Hurcom S. J., Harrison A. R. 1998. The NDVI and spectral decomposition for semi-arid vegetation abundance estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 3109–3125.
- Jetten V. G. 1994. Modelling the effects of logging on the water balance of a tropical rain forest. *Water Resources Research*, 29: 2637–2649.
- Jong de S. M. 1994. Applications of reflective remote sensing for land degradation studies in a Mediterranean environment. Utrecht, The Royal Dutch Geographical Society, Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University. ISBN 90 6809 191.
- Jong de S. M., Epema G. F. 2001. Imaging spectrometry for surveying and modelling land degradation. w: Imaging spectrometry. Basic Principles and Prospective Applications. FD. van Der Meer, and S.M. de Jong (eds). Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic: 65–86.
- 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.
- Keim, R. F., Skaugset A. E., Link T. E., Iroumé A. 2004. A stochastic model of throughfall for extreme events. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8: 23–34.
- 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
- Klaassen W., Lankreijer H. J. M., Veen A. W. L. 1996. Rainfall interception near a forest edge. *Journal of Hydrology*, 185: 349–361
- Klamerus-Iwan A. 2010. Intercepcja wybranych gatunków drzew leśnych w warunkach badań laboratoryjnych. Rozprawa doktorska. Maszynopis w Katedrze Inżynierii Leśnej Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.
- Klamerus-Iwan A., Owsiak K. 2013. Ocena konstrukcji prototypowego stanowiska do badań nad intercepcją drzew leśnych w warunkach laboratoryjnych. *Sylwan*, 157(6): 464–469.
- Kołodziej J., Liniewicz K., Bednarek H. 2005. Intercepcja opadów atmosferycznych w łąkach zbóż. *Acta Agrophysica* 6(2), 381–391
- Kowalik P. 1995. Obieg wody w ekosystemach lądowych. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk*, 9: 1–84.
- Kuczka J. 2007. Właściwości hydrologiczne materii organicznej gleb leśnych na przykładzie gleb pod świerczynami isticznymi. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie* 442. *Rozprawy*, 320: 1–176.
- Leonard R. E. 1967. Mathematical theory of interception. w: Forest Hydrology. W. E. Sopper and H. W. Lull (eds). Pergamon Press: 131–136.
- 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.
- Liu J. 1988. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modeling*, 42: 111–123.
- Liu S. 1992. Predictive models of forest canopy interception. *Scientia Silvae Sinica*, 28: 445–449.
- Liu S. 1997. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecological Modeling*, 99: 151–159.
- Llorens P., Poch R., Latron J., Gallart F. 1997. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. I. Monitoring design and results down to the event scale. *Journal of Hydrology*, 199(3–4): 331–345.
- 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: 397–407.

- Massman W. J. 1980. Water storage on forest foliage: a general model. *Water Resources Research*, 16: 210–216.
- Massman W. J. 1983. The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forests. *Agricultural Meteorology*, 28: 261–286.
- Merriam R. A. 1960. A note on the interception loss equation. *Journal of Geophysical Research*, 65: 3850–3851.
- Miler A. 1994. Modelowanie matematyczne zdolności retencyjnych małych zlewni nizinnych. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy Naukowe*, 258: 1–92.
- Miler A. T. 2008. Las i woda – zagadnienia wybrane. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, 10, 2 (18): 24–32.
- Miler A. T., Okoński B., Grajewski S. 2001. Stosunki wodne w wybranych ekosystemach Puszczy Zielonka. Poznań, Wyd. Akademii Rolniczej.
- Molchanov A. A. 1960. *Gidrologicheskaya rol' lesa*. Moskva, Izdat. Akad. Nauk SSSR.
- Mulder J. P. M. 1985. Simulating interception loss using standard meteorological data. w: B.A. Huchison and B.B. Hicks (eds) *The Forest-Atmosphere Interaction*. Dordrecht, D. Reidel Publishing Company: 177–196.
- Nachorecka-Duda H., Ratomaska B. 2002. Rola retencyjności roślinności niskiej w formowaniu odpływu. *Czasopismo Techniczne, Środowisko*, 99, 5: 111–118.
- Okoński B. 2007. Hydrological response to land use changes in central European lowland forest catchments. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 15,1: 3–13.
- Olszewski J. 1965. Pomiary opadu deszczu w grądzie w Białowieskim Parku Narodowym. *Sylvan*, 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. *Sylvan*, 10: 45–53.
- Orzeł W. 1980. Intercepcja opadów atmosferycznych w łańcuch roślin uprawnych. Praca doktorska wykonana w Zakładzie Agrometeorologii Akademii Rolniczej w Lublinie.
- Ostrowski S. 1965. Wpływ opadów atmosferycznych i wód gruntowych na przyrost wysokości i grubości sosny pospolitej. Warszawa, IBL ZGW.
- Osuch B. 1994. Opad netto w drzewostanie na tle właściwości retencyjnych powierzchni roślin. *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej*, Monografia 166.
- Osuch B., Homa A., Feliks M. 2005. Opis pojemności zbiornika intercepcyjnego sosny zwyczajnej (*Pinus silvestris*). *Czasopismo Techniczne. Środowisko*, 102, 10: 71–84.
- Osuch B., Homa A., Feliks M., Kulig M. 2005a. Zbiornik intercepcyjny brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth). *Czasopismo Techniczne. Środowisko*, 10: 103–118.
- Owsiak K., Klamerus-Iwan A., Gołąb J. 2013. Wpływ aktualnego stanu zraszanej powierzchni na przyleganie wody deszczowej w kontekście badań laboratoryjnych nad intercepcją drzew. *Sylvan*, 157 (12): 922–928.
- 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.
- Putuhena W., Cordery I. 1996. Estimation of interception capacity of the forest floor, *Journal of Hydrology*, 180: 283–299.
- Pypker T. G., Bond B. J., Link T. E., Marks D., Unsworth M. H. 2005. The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130: 113–129.
- Ramirez A., Senarath A. S. 2000. A statistical-dynamic parameterization of interception and land surface-atmosphere interactions. *Journal of Climate*, 13: 4050–4063
- Respondowski R. 1999. *Laboratorium z fizyki*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Robin L. H. 2003. Interception loss as a function of rainfall and forest types: Stochastic modeling for tropical canopies revisited. *Journal of Hydrology*, 280: 1–12.
- Rutter A. J., Kershaw K. A., Robins P. C., Morton J. 1971. A predictive model of rainfall interception in forests: I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 9: 367–384.
- Rutter A. J., Morton A. J., Robins P. C. 1975. A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology*, 12: 367–380.
- Rutter, A. J., and A. J. Morton. 1977. A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. *Journal of Applied Ecology*, 14:567–588.
- Seidl R., Eastaugh C.S., Kramer K., Maroschek M., Reyer C., Socha J. et al. 2013. Scaling issues in forest ecosystem management and how to address them with models. *European Journal of Forest Research*, 5–6: 653–666.
- Schulze R. E., Scott-Shaw C. R., Nanni U. W. 1978. Interception by *Pinus patula* in relation to rainfall parameters. *Journal of Hydrology*, 36: 393–396.
- Soczyńska U. (red.) 1997. *Hydrologia dynamiczna*. Warszawa, PWN. ISBN 83-01-12310-9.
- Stankiewicz H. 1971. *Zabezpieczenie budowli przed wilgocią, wodą gruntową i korozją*. Warszawa, Arkady.
- Suliński J. 1993. Modelowanie bilansu wodnego w wymianie między atmosferą, drzewostaniem i gruntem przy użyciu kryteriów ekologicznych. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, Rozprawy*, 179: 1–134.
- Suliński J. 1995. Czynniki różnicujące wartości składowych bilansu wodnego drzewostanów zagospodarowanych zrębowo. *Sylvan*, 139 (11): 49–65.
- Suliński J., Starzak R., Kucza J. 2001. Weryfikacja wzoru wyrażającego intercepcję drzew w zależności od natężenia i czasu trwania opadu deszczu, w warunkach eksperymentalnych. *Acta Agraria et Silvicultura, Series Silvestris*, 39: 3–16.
- Suliński J., Owsiak K. 2009. Premises for the construction of balance equations of water reserves in the saturation zone of forest soil. *Journal of Water and Land Development*, 13b: 87–108.

- Suliński J., Starzak R. 2009. Premises for the construction of balance equations of water losses in mountain forest soils. *Journal of Water and Land Development*, 13a: 329–344.
- Teklehaimanot Z., Jarvis P. G. 1991. Direct measurement of evaporation of intercepted water from forest canopies. *Journal of Applied Ecology*, 28: 603–618.
- Toba T., Ohta T. 2005. An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests. *Journal of Hydrology*, 313: 208–220.
- Toba T., Ohta T. 2008. Factors affecting rainfall interception determined by a forest simulator and numerical model. *Hydrological Processes*, 22 (14): 2634–2643.
- Torres Sempere D., Porr J. M., Creutin J. D. 1994. A general formulation for raindrop size distribution. *Journal of Applied Meteorology*, 33: 1494–1502.
- Tsukamoto Y., Tange I., Minemura T., 1988. Interception loss from forest canopies. *Rolling Land Research*, 6: 60–82 [w jęz. japońskim, z angielskim abstraktem].
- Uijlenhoet R., Stricker J. 1999. A consistent rainfall parametrization based on the exponential raindrop size distribution. *Journal of Hydrology*, 218: 101–127.
- Yoshida H., Hashino M., Muraoka K. 1993. A method of estimating forest rainfall interception by tank model based on stem flow data. *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources*, 6: 19–30 [w jęz. japońskim, z angielskim abstraktem].
- Yulianur A., Yoshida H., Hashino M. 1998. The estimation of rainfall interception loss using Hamon's potential evaporation and linear regression. *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources*, 11: 141–149 [w jęz. japońskim, z angielskim abstraktem].
- Zinke P. J. 1967. Forest interception studies in the United States. w: W. E. Sopper and H. W. Hull (eds) *Forest Hydrology*. Oxford, Pergamon Press.
- Zeng N., Shuttleworth J. W., Gash J. 2000. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. *Journal of Hydrology*, 228 (3–4): 228–241.

Different views on tree interception process and its determinants

Anna Klamerus-Iwan

University of Agriculture in Kraków, Faculty of Forestry, Department of Forest Engineering,
Al. 29 Listopada 46, 31–425 Kraków, Poland.

Tel. +48 12 662 53 56; email: annaklamerus.iwan@gmail.com

Abstract. The subject of the study is the process of interception by plants defined as the process of retaining rainfall water on plant surface, counting retention by individual plant parts or the vegetation cover as the whole. In the quantitative approach, interception capability of plants may be compared to a reservoir, the capacity of which is determined mostly by the surface of plants. Among many approaches to describe interception processes, a lot of attention has been focused on research concerning the forest vegetation with reference to atmosphere - forest stand - soil balance. Hence, in the present paper interception issues are addressed in view of forest ecosystems. The emphasis is also put on the methods and results of studies carried out under laboratory conditions.

Up-to-date literature on interception is abundant. The authors tackling this issue regularly define their own variable and complex sets of terms. This paper is an attempt to review and organise knowledge presented in existing literature on the subject.

Key words: forest water balance, canopy storage capacity, rainfall intensity, size of raindrops

1. Introduction

In the field of hydrology, interception by plants is deliberated essentially in view of two aspects: as the component of the catchment water balance or as the element of water flow in the atmosphere-tree stand-soil system. Notwithstanding the need for systematising concepts, methods and research results, there has to be stressed that interception is an important factor in the forest water balance, which in turn has all-embracing influence on microclimate associated with air humidity as described by, e.g. Aussenag (2000).

In dynamic hydrology, the concept of interception embraces the processes ongoing within the whole catchment area and includes long-term periods of rain precipitation as well as the periods of water evaporation from plant surfaces in the periods in-between rainfalls. A broad study on this subject was presented by Osuch (1994). Interception topic has been also contemplated in

textbooks, and among others those written by Soczyńska (1997) and Gutry-Korycka et al. (2003). Interception in the catchment water balance can be evaluated based on the hydrograph of water outflow at the closing profile in the catchment. The catchment average values represent the water balance components determined based on the outflow hydrograph; therefore, by definition, catchment interception assessed cannot be identified with plant interception taking place in forest ecosystems. The distinction of forest ecosystem interception is one of the key difficulties in the evaluation of forest role in the catchment water balance. There has not yet been complete knowledge on *inter alia* how tree stand taxonomic features and habitat conditions changing with time both naturally and because of silvicultural treatments, as well as various abiotic and biotic factors shape water outflow in forests with changeable interception (Miler 2008). There lack tangible parameters and formulas that would address these issues mathematically. An important at-

tempt to eliminate this information gap can be elaboration and improvement of methodology for using data on site and stand conditions available in forest management plans to compute the parameter of physiographic conditions and to include that in mathematical models describing the effective rainfall (Soil Conservation Service – SCS) (Grajewski 2006; Okoński 2007). In the preset paper, the relationship between interception of forest vegetation and the effective rainfall was excluded.

In the context of the water balance, Sulinski (1995) lists four most important features distinguishing forest ecosystems from agricultural systems: (1) belonging to the higher level of life organisation, (2) ability to fully cover the space occupied by plants with biomass, (3) strong differentiation of the volume density of individual plant organs and (4) all-year multi-layer ground cover. These differences are probably the reason why the methodology used and the results obtained in the studies carried out on interception of agricultural plants as well as mathematical models concerning the latter (Orzeł 1980; Kowalik 1995; Kołodziej et al. 2005) cannot be wholly applied for forest plant communities.

In the studies on forest ecosystems, interception is very often analysed based on plant surface types, such as foliage, shoots and tree trunks or else there are examined precisely distinguished plant parts (Brechtel 1990). This is done for different reasons, and by and large it is about achieving a particular research goal, for example, the assessment of pollutant concentration in wet precipitation. One way or another, investigations are directed towards better understanding of the differentiation of interception as a physical process. As an example, there can serve studies on interception of the lower forest storey carried out by Nachorecka-Duda and Ratomska (2002), on interception division in stand storeys and layers conducted by Link et al. (2004) and studies performed by Calder (1999) as well as Jong and Jetten (2007) who stressed the importance of stand storeys in interception processes. Calder (1999) additionally connected the effect of tree stand storeys with the fact that raindrops reaching lower forest layers are of the smaller size and have less kinetic energy. There also have been published study results on stand interception capabilities reliant upon stand canopy closure (Głogowska, Olszewski 1967; Gash et al. 1995).

There are lots of ways to present interception as a mathematical model describing water exchange in atmosphere-tree stand-soil system. The vast majority of the formulas include the period of water reserve increase in conjunction with the period of water loss. Then, interception is somewhat hidden in evapotranspi-

ration, which can be exemplified by Benecke's (1976) model. Suliński (1993) divides the phase of water reserve increase from that of water loss and treats interception directly as the component of the model of soil water recharge phase (1)

$$Z_p = P - [(I_d + I_r + I_s) + \Delta'q_s + \Delta'q_i + \Delta'q_g] \quad (1)$$

where : Z_p – increase of water reserves in the ground; P – rainfall above tree canopy; I – interception of: d – trees, r – ground cover, s – litter; $\Delta'q$ – water runoff from slope unit during water recharge phase: s – surface; i – interflow; g – ground.

In this approach, interception can be estimated as the difference between a singular rainfall and an increase in water reserves in soil (most of all – leaching soil) with the groundwater table freely available to plant roots. In the water balance model, interception is included in the phase of soil water recharge and it reduces the amount of water that reaches soil. The works of Suliński and Owsiak (2009) and Suliński and Starzak (2009) confirm the usefulness of models constructed in the above way.

Interception is an important numerical component of the water balance. Pike and Scherer (2003) expressed the view that interception was the key issue in forest hydrology. Already Zinke (1967) and Blake (1975) pointed out a possibility of rainfall interception by forest tree stand ranging from 10% to 30% and identified significant factors in interception measurements, i.e. air humidity and stand canopy closure. Calder (1999) reported interception value as high as 50%.

Notwithstanding differences in forest species composition as well as forest structure and density, and also rainfall characteristics associated with climatic conditions, interception should be included in simulation models of the processes such as evapotranspiration, soil water outflow and ground retention (Chang 2003) or else in the water balances with special purposes, as for example those investigated in geochemical studies (Hörman et al. 1996) or in research on nitrogen circulation in the atmosphere (Loescher et al. 2002).

Literature with available data on interception measurements obtained in certain geographical and forest stand conditions has been abundantly available. In Poland, rich data sources on stand water interception are the works by Ostrowski (1965) and Olszewski (1965, 1984). The compilation of interception values obtained in local observations was attempted by, e.g. Pei et al. (1993). The majority of researchers determined interception as the difference in rainfall measured above and under tree canopy (Olszewski 1984; Aston 1979; Jetten 1994; Feliksik

et al. 1996; Calder 2001; Gomez et al. 2001; Bryant et al. 2005; Pypker et al. 2005). Spatial and temporal distribution of interception is difficult to compile; thus, there prevails the view that in practice comparisons of the results obtained under different conditions is too difficult due to methodological variations as well as research site differentiations and different timings of the measurements carried out (Crockford, Richardson 2000; Jong, Jetten 2007).

2. Factors influencing interception processes

In the light of knowledge on wetting processes ongoing on various surfaces (not only those of plants) and water retention on them (Stankiewicz 1971), there should be recognised that it is essential to reflect on the status of the wetted surface when investigating interception.

It is commonly accepted that interception volume is directly related to the size of the surface of the aboveground plant part. In earlier studies, there were undertaken efforts to describe tree surface area based on its similarity to other tree or stand biometric features. For example, Czarnowski (1978) or Teklehaimanot and Jarvis (1991) assumed the linear relationship between interception and the number of trees per hectare.

At the present time, in the majority of the studies on interception, the crown area is determined with the use of leaf area index (LAI) (Harrison 1993; Hurcom and Harrison 1998). This approach is associated with the development of methodology and equipment used for LAI determination. Water retention capability of tree crowns was linked to LAI values by *inter alia* Klaassen et al. (1996). These authors state that the tree crown, i.e. its structure and dimensions, decides on the percentage of the total rainfall, which does not reach soil. Relationship between LAI and interception of stands was observed in different types of stands by Gomez et al. (2001), Hall (2003) as well as Jong and Epema (2001). The latter authors additionally pointed to a possibility to determine LAI distribution in tree crowns by means of photograph spectral mixture analysis. The importance of LAI values distribution was analysed in the later study carried out by Jong and Jetten (2007). The authors stressed that the relationship between plant water retention capability and LAI had been understood only for some plant species and vegetation types, but tree crowns were not the case due to too scarce data available.

Llorens i Gallart (2000) proposed basic measurement methods for the assessment of tree crown ability to capture rain, but Bryant et al. (2005) pointed out that appropriate data interpretation required the full description of crown parameters in conjunction with climatic conditions.

The development of mathematical models describing the transformation of rainfall into outflow, where individual types of retention are perceived as the system of reservoirs, forced treating plant interception as a specific kind of reservoir with a certain volume. An attempt to determine water capacity of Scots pine interception reservoir was undertaken by Osuch et al. (2005, 2005a). These authors calculated the area of leaves and that of the bark separately, if possible – with the division of the vertical cross-cut of the tree into sections. The green area was treated as a unified patch capturing water on its top and underneath surfaces. They distinguished the bark of young and older shoots due to the fact that the latter have higher water retention capacity. The authors noted that at the end of the vegetation season – at the start of defoliation processes, rain adhesion on leaves was higher. They also drew the attention to the difficulties in converting data on selected trees into statistics concerning the whole stand on a certain area.

In view of contemporary knowledge, the size of plant surface that retains rainfall is a prevailing but not dominating factor in the determination of plant interception. Other factors associated with the state of the surface can significantly influence water retention as well. However, separate examinations of all the factors that theoretically should be included in the calculation pose a lot of difficulties in reality.

Some of the opinions on the influence of species features on water interception are of hypothetical nature but not the statements based on research results. For example, there is the view proclaimed that the coniferous forest lets less water through its canopy when compared with the deciduous forest. The reason for that is the fact that water is captured at needle tips in form of droplets, whereas it flows down wetted areas of flat leaves relatively easily. The subject matter is hard to explore given that tree interception is quite small after one rainfall. For example, Rutter et al. (1975) determined saturation capabilities of the canopy of deciduous trees (common hornbeam and red oak) and those of coniferous trees (Douglas fir, Norway spruce and black pine) as 0.5–2 mm. Consequently, there has to be accepted the opinion of Keim (2004) that crown capability to intercept water can be treated as the fixed value only in the case of singular rainfall, bearing in mind that subsequent rainfalls would modify this value.

Crockford and Richardson (2000) recognised crown capability to intercept water as a key species feature affecting interception. On the other hand, Bryant et al. (2005) concluded that tree stands differentiated with regard to species composition were similar in terms of water losses.

Osuch (1994) and Osuch et al. (2005) drew attention to seasonal changes in the ability of plant area to intercept water. Analogous changeability was observed by Zeng et al. (2000). At the moment, there is a lack of clear evidence that this should be connected to rainfall temperature altering in the seasons or else with morphological foliage features which also change with time. Theoretically, the temperature of rainfall or foliage surface should constitute important factors of rainfall adhesion. At the same stroke, rainfall temperature significantly influences the size of raindrops (Owsiak et al. 2013).

Among the factors influencing interception volume, there is a degree of contamination of plant surface with dirt, which changes during the vegetation period (Jong and Jetten, 2007). It is worth adding that dirt film is influenced by the presence (or lack) of waxes impregnating cuticular membrane that covers leaf epidermis, and the latter depends on natural species features and possible effects of atmospheric pollutants (Gruszka 1991). The volume of water intercepted by plants is reliant upon not only the leaf area, but also upon plant species features and its status as well as rainfall characteristics. With regard to the latter, rainfall intensity and the size of raindrops are two main factors emphasised in literature on the subject.

Schulze et al. (1978) performed regression analysis of interception losses dependent on rainfall duration. Rainfall intensity was analysed in four intervals: 0.0–1.4, 1.5–2.9, 3.0–5.9, > 6.0 mm/h. The results obtained showed that interception increased together with increasing intensity of rainfall if it was adequately long. Similar observations were reported by Hattori et al. (1982). Several authors, e.g. Yulianur et al. (1998), Yoshida et al. (1993) and Hashino et al. (2002), determined interception as the mean value per 1 h of rainfall with average intensity and confirmed strong correlations between the factors analysed.

Suliński (1993) reviewed 117 interception cases described in subject literature with the aim to verify Czarnowski's equation on stand interception (see equation 4, Czarnowski, Olszewski 1968; Czarnowski 1978) and concluded that the amount of water captured on trees was proportional to the size of their surface. The author also drew attention to the fact that interception volume was determined not so much by rainfall volume itself but also rainfall intensity.

At the start, the surface of plants is quickly covered by water, and then the process slows down until reaching the maximum water cover value. Osuch (1998) connected this phenomenon with rainfall intensity and the plant density index. The effect of rainfall intensity on

interception volume is not always of linear nature. It depends on rainfall intensity value (Lorens et al. 1997; Caryle-Moses 2004).

Tsukamoto et al. (1988) assessed 1-h values of tree interception at low rainfall intensity and stated that interception volume was proportional to rainfall intensity only in the range of up to 7.0 mm/h. Toba and Ohta (2008) also observed that interception increment decreased exponentially with increasing rainfall intensity. Interception varied a lot when rainfall was low, and then it did not exceed 0.2 mm.

The role of rainfall intensity in shaping interception volume is of key importance, however, up to date it has been poorly understood, and that is why Asdak et al. (1998) as well as Tobo and Ohta (2008) stressed a need for undertaking further studies on this issue.

Deliberations on physical aspects of raindrop formation and its adhesion on plant surface, which were fundamental to building up better structured theoretical knowledge on interception, have been subject of interest for a long time. For example, there was discussed the effect of the size of raindrops on the energy of its fall onto ground and plant surfaces (Chapman 1948). The influence of rainfall characteristics on water amounts captured on plants was described by Robin (2003). Indisputably, the studies on precipitation have so far prevailed in the field of meteorology. Recently, rainfall investigations have become important in hydrological research, and more than ever after bringing laser measurement equipment into practice, which allowed investigating the processes of formation and transportation of water droplets in the air.

Hall and Calder (1993) carried out the experiments with a rain simulator using a laser precipitation monitor (disdrometer) and showed that wetting parameters, which determine how much water can be intercepted on the plant, depended on raindrop size as well on the number of droplets formed as a result of bouncing off the surface. The authors suggested that relations between raindrop size and rainfall intensity should be better understood as an important factor in interception assessments.

Tores et al. (1994) showed relationships between raindrop sizes and rainfall intensity. They observed the changes in the parameters of rainfall during its time duration. Uijlenhoet and Stricker (1999) believed that the relationship among raindrops and rainfall intensity and interception was stronger than that so far recognised; however, Calder (1999) did not share this opinion.

According to the results of Calder et al. (1996) and Calder (1999), the capability of crown to intercept water

increases with decreasing raindrop size and rainfall intensity. Calder (1999) subdivided rainfall into the fractions of primary and secondary contact with the plant and linked these with the trees in forest storeys. Link et al. (2004) stated that the size of raindrops had not as much influence on water interception in the second storey of tree stand because the latter was reached only by the raindrops bounced off top branches.

Calder (1999) tried to explicate the effect of water losses on plant interception at a global level by means of stochastic models. In coniferous forests growing under temperate climate, interception is very high due to small raindrop size and relatively low rainfall intensity. In tropical forests, where rainfalls are characteristic of high intensity and large raindrop sizes, interception is low due to wetting of the leaf area in short supply. Also, generally larger leaf area in tropical forests when compared with that in temperate forests contributes to the aforesaid differences in interception as well.

3. Selected models of tree interception

The mathematical formulas that describe interception volume in forest vegetation can be generally divided into two main groups: (1) based on physical features of the process of water interception by tree canopy (Rutter 1971; Gash 1979) and further modified (Massman 1983; Mulder 1985; Liu 1988, 1992) and (2) regression equations of purely academic character or further founded on natural determinants (Horton 1919; Merriam 1960; Leonard 1965; Czarnowski i Olszewski 1968; Czarnowski 1978; Aston 1979; Massman 1980; Calder 1986; Suliński 1993).

The models placed in the first group are based on the determinants associated with water balance calculations concerning tree surface. As an example, there can serve the works of Rutter et al. (1971, 1975, 1977), which resulted in forming the model describing changes of canopy water capacity during rainfall (Rutter and Morton 1977):

$$\frac{dC}{dt} = (1-p)R - E - k(e^{hC} - 1) \quad (2)$$

where C – is the canopy water capacity, p – free throughfall coefficient, R – rainfall, E – evaporation k , h – empirical parameters, t – time duration of one rainfall.

In the models from the second group, there is considered information based on measurement results indicating that interception increases only with a certain amount of the total rainfall.

Seppänen (1963) (and also Leonard 1967) proposed the following interception model:

$$i_{dk} = (X_1 + X_2 E_t) (1 - e^{-cP}) \quad (3)$$

where i_{dk} – canopy interception, X_1 and X_2 – measures of the leaf area and leaf surface moisture; E_t – evaporation from the leaf area in time P – above-canopy rainfall in time t ; c – proportionality factor.

The cited form of the model (3) has been modified several times in line with the results of specific research (Liu 1997).

Czarnowski and Olszewski (1968) built a similar model of hornbeam stand interception:

$$i = i_m (1 - e^{-\alpha P}) = 10.1 (1 - e^{-0.06P}) \quad (4)$$

where i – interception, P – above-canopy rainfall; i_m – maximum possible interception, when $P \rightarrow \infty$; α – the species constant value.

Czarnowski (1978) presented generalised form of the above model (4) in the first edition of plant ecology textbook. The model includes a novel approach, i.e. the introduction of maximum interception, which depends on the size of plant surface and the parameter called ‘rainfall adhesion’.

Sulinski (1993) verified the above model (4) and proposed the following alteration:

$$i_d = \left[\beta i_{0d} \left(0.157 \sum_{j=1}^n D_j H_j N_j \right) \right] \left[(1 - e^{-\phi s}) (1 - e^{-\gamma t}) \right] \quad (5)$$

where i_d – tree interception (mm); i_{0d} – initial interception (mm); D_j , H_j , N_j – average diameter breast heights (cm), tree height (m) and tree numbers (thou. sp./ha) for a given species j ; s – intensity of one rainfall (mm/h); t – time duration of one rainfall (hours); β – surface status parameter (rainfall adhesion), ϕ , γ – scaling parameters (to compute at model classification).

The above model (5) indicates that the process of interception can be compared with filling up a leaky reservoir with the capacity defined as potential interception, replenishing of which after one rainfall depends on the intensity and time duration of this rainfall.

The model built by Aston (1979) can serve as an example of the search for an appropriate model including the effect of rainfall characteristics on shaping interception:

$$I = C_p S_{\max} \left(1 - e^{-\frac{kP}{S_{\max}}} \right) \quad (6)$$

where I – tree canopy interception; C_p – function of canopy water coverage; S_{\max} – maximum water capacity of canopy (mm); k – tree crown coefficient; P – precipitation amount.

In the above model (6), the effect of rainfall amount on shaping interception was expressed according to the Mitscherlich function, however, with alteration of the scaling factor for P variable into k/S_{max} . The author of the model stated that the value k of each dense and closed crown in fact depends on LAI, tree crown structure, rainfall intensity and wind power, even though k value theoretically = 1. Therefore, bracketed component of the model reflects not only rainfall characteristics but also includes a broader perspective.

4. Studies on interception carried out under laboratory conditions

Direct field measurements of forest trees and undergrowth are still complicated with regard to methodology and logistics, even though at the present time, there has been widely employed radar and laser equipment allowing for investigations on the movement of raindrops through vegetation layers. Thus, qualitative descriptions of interception do not provide neither for required precision nor generalisation needed in hydrological studies. Hence, the advancement on knowledge on the factors shaping forest community interception can be reached up to a time based on studies carried out under controlled conditions (Anzhini et al. 2007). And the results of these can provide numerous data for building mathematical models based on ecological criteria (Czarnowski 1978; Suliński et al. 2001).

Laboratory research on interception is conducted with reference to individual trees, the size of which allows for their placement on measurement stations designed for controlling both the parameters of sprinkled with water object and those of simulated precipitation. It should be noted, however, that the results obtained on interception of individual herbaceous plants or else trees do not clearly translate into interception of the whole stand (Czarnowski 1978; Rupert 2013). There exists a risk of neglecting the factors that seem inconsequential under laboratory conditions but are important in estimating interception under field condition. For example, Liu (1997) did not take into consideration evapotranspiration between subsequent rainfalls when interpreting the laboratory results obtained in his study.

Pei et al. (1993) studied the aspects of rainfall capture in the canopy and concluded that interception model built should also include the description of interception changeability due to rainfall intensity and canopy features. Consequently, the authors carried out an experiment under the conditions, which allowed for controlling both precipitation intensity and the param-

eters of sprinkled surface (pine tree, 4-m high, 4.21-m² crown projection area). In the course of the experiment, the leaf area was measured with LAI 2000 Plant Canopy Analyser so as to manage scheduled decrease of leaf area treatment with water. Precipitation intensity was regulated with specific equipment steered by computer software. The results of the experiment allowed for conclusion that the more precipitation intensity increases the lesser water stays on plant surface. At the same time, interception increment reaches its maximum value faster at greater precipitation intensity. The authors pointed to a need for further investigations on maximum factual interception per surface unit. In the context of Poland's precipitation conditions, the results of this study draw attention to great intensity of simulated rainfall.

Potuhena and Cordery (1996) investigated the interception of fallen down pine needles from 15-year-old pine stand and fallen down leaves and shoots from eucalyptus forest. They also took samples of forest undergrowth from both types of analysed forests. Interception of all the collected components of ground cover was measured under the conditions of simulated precipitation in the laboratory. Interception of ground cover in pine forest was 2.8 mm, and that in eucalyptus forest was 1.7 mm. Interception capacity of all the components of forest ground cover was proportional to sample weight per area unit or else to ground cover thickness. In the case of standing grasses, interception capacity was proportional to percentage soil cover by these plants.

Suliński et al. (2001) carried out *ceteris paribus* studies under controlled conditions with the aim to verify coefficients used in their interception model (see model 6). Two tree species were included in the study: common beech and Norway spruce. The trees were sprinkled with simulated rainfall with intensity 1.22–9.72 mm/h through 80 min (beech) and 100 min (spruce). The trees were surrounded with a cylinder limiting water evaporation from tree surfaces during water treatment. After each water treatment, the trees were air-dried. Interception was calculated as the difference between two values: mass of water used for artificial rainfall and that of water dripping from the trees. Interception values obtained showed that real interception increased with increasing precipitation intensity, interception increment reached its maximum in similar time duration from the start of water sprinkling for all experimental repetitions, and spruce tree interception was considerably greater than that of beech tree.

Klamerrus-Iwan (2010) investigated 1-m high trees of five species: oak, beech, pine, fir and spruce. At the same time, all experimental observations were made on

two mock-up deciduous trees made of plastic material with constant surface parameters irrespective of water sprinkling duration. Interception was investigated with the use of original methodology on the measurement station constructed following the author's own design.

The amount of water captured by experimental objects during water sprinkling was measured 75 times on the trees observed and 30 times on mock-ups taking 1-min time intervals. The results of the experiment allowed for the conclusion that potential interception was reliant upon basic tree features, first of all upon plant surface size and its sorption capabilities that were modified during water treatment. The time needed for reaching potential interception depended on precipitation intensity and raindrop size.

Keim et al. (2006) carried a laboratory study on the shoots of nine tree species. Shoot tips were secured with paraffin and treated with simulated precipitation for 6 h. Biomass of each shoot and LAI were determined for each shoot observed. There was used a sprinkler with ability to regulate precipitation intensity in a range from 20 to 420 mm/h droplet size from 1 to 2.8 mm. On the shoots of all the tree species observed, interception increased with increasing precipitation intensity. Coniferous trees intercept less water per biomass unit, but more when calculated with reference to LAI. The leaf area was a more useful indicator of water interception capability than biomass.

Toba and Otha (2008) conducted a study aiming at broadening knowledge on the phenomenon of water droplets bouncing off the surface. A fir tree (60-cm high) was used in the experiments. Four replications of water sprinkling were carried out, and the area watered was decreased through LAI reduction by means of cutting off tree shoots. It was concluded that bouncing off droplets constituted 60% of interception, the number of bounced off droplets increased with interception, which did not depend on LAI.

5. Conclusions

Summarising up to date knowledge on plant interception viewed as the process ongoing during possible to distinct separate rainfall, it can be assumed that the attention of hydrologists seeking solutions for the catchment water balance as well those studying certain forest ecosystems is focused on interception issues. The approaches of both groups are different, not only with regard to the goals to be reached but also in terms of research methodology and result description. In all cases, various models are built, which are founded too different extents on physical laws, and not that often – on genuine knowledge concerning the principles that determine the dynamics of tree stand

growth. Possibly that is why, when dealing with the catchment water balance, great attention is paid to the status of plant surface itself, and much smaller interest is focused on rainfall characteristics. This approach is uncritically represented in the studies on the forest water balance. Accordingly, it seems indispensable to conduct further studies under controlled conditions which will be directed towards more precise assessment of relationships determining the process of interception. Better knowledge on these relationships assessed using measurable parameters could be used in better understanding of the water balance relationship: atmosphere–tree stand–soil at an ecosystem level.

References

- Anzhi W., Yiwei D., Tiefan P., Changjie J., Jiaojun Z. 2007. A semi-theoretical model of canopy rainfall interception for a broad-leaved tree. *Hydrological Processes* 21 (18): 2458–2463.
- Aston A. R. 1979. Rainfall interception by eight small trees. *Journal of Hydrology* 42: 383–396.
- Aussenag G. 2000. Interaction between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science* 57: 287–301.
- Benecke P. 1976. Soil water relations and water exchange of forest ecosystems, in: Water and plant life (eds: O. L. Lange, L. Kappen, E.-D. Schulze). Berlin, Springer Verlag.
- Blake G. J. 1975. The interception process, in: T.G. Chapman and R.X. Dunin (eds), Prediction in Catchment Hydrology. Netley, Australian Academy of Science: 59–81.
- Brechtel H. 1990. Monitoring wet deposition in forest – quantitative and qualitative aspects, in: Monitoring air pollution and forest ecosystem research. Commission of the European Communities Environment and Quality of Life. Report EUR 12451, Bilthoven, The Netherlands.
- Bryant M. L., Bhat S. and Jacobs J. M. 2005. Measurements and modeling of throughfall variability for five forest communities in the southeastern US. *Journal of Hydrology* 312: 95–108.
- 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.
- 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.
- 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.

- Carlyle-Moses D.E., Price A.G. 1999. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal of Hydrology* 214: 103–110.
- Chang M. 2003. Forest hydrology: an introduction to water and forest. Boca Raton, CRC Press. ISBN 0-8493-1363-5.
- Chapman G. 1948. Size of raindrops and their striking force at the soil surface in a red pine plantation, *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 29: 664–670.
- 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.
- Czarnowski M. S. 1978. Zarys ekologii roślin lądowych. Warszawa, PWN.
- Czarnowski M. S., Olszewski J. L. 1968. Rainfall interception by a forest canopy. *Oikos*, 21: 48–51.
- Feliksik E., Durło G., Wilczyński S. 1996. The interception of rainfall in mixed forest stands. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie* 5: 15–22.
- Gash J. H. C. 1979. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 105: 43–55.
- Gash J. H. C., Loyd C. R., Lachaud G. 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology* 170: 79–86.
- Głogowska J., Olszewski J. 1967. Opad deszczu w lesie liściastym. *Sylwan* 5: 55–64.
- 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
- Grajewski S. 2006. Zastosowanie analizy skupień w porównawczych badaniach zdolności retencyjnych ekosystemów leśnych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 3/1: 155–169.
- Gruszka A. 1991. Wpływ symulowanych kwaśnych deszczów na wybrane gatunki drzew leśnych. Praca doktorska wykonana w Katedrze Ekologii Lasu, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie.
- Gutry-Korycka M., Nowicka B., Soczyńska U. 2003. Rola retencji zlewni w kształtowaniu wezbrań opadowych. Warszawa, Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych.
- Hall R. L. 2003. Interception loss as a function of rainfall and forest types: stochastic modelling for tropical canopies revisited. *Journal of Hydrology* 280: 1–12.
- Hall R. L., Calder I. R. 1993. Drop size modification by forest canopies-measurements using a disdrometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 90: 465–470.
- Harrison A., Taberner M., Hurcom S. 1993. Site-based remote sensing of vegetation and land cover. In JB Thornes and CJ Brandt (eds) MEDALUS I Final Report. European Community, pp. 225–263.
- Hattori S., Chikaarashi H., Takeuchi N. 1982. Measurement of the rainfall interception and its micrometeorological analysis in a Hinoiki station. *Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute (Bulletin of FFPRI)* 318: 79–102.
- Hashino M., Yao H., Yoshida H. 2002. Studies and evaluations on interception processes during rainfall based on a tank model. *Journal of Hydrology* 255: 1–11.
- 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.
- Horton R. E. 1919. Rainfall interception. *Monthly Weather Review* 47: 603–623.
- Hurcom S. J., Harrison A. R. 1998. The NDVI and spectral decomposition for semi-arid vegetation abundance estimation. *International Journal of Remote Sensing* 19: 3109–3125.
- Jetten V. G. 1994. Modelling the effects of logging on the water balance of a tropical rain forest. *Water Resources Research* 29: 2637–2649.
- Jong de S. M. 1994. Applications of reflective remote sensing for land degradation studies in a Mediterranean environment. Utrecht, The Royal Dutch Geographical Society/ Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University. ISBN 90 6809 191.
- Jong de S. M., Epema G. F. 2001. Imaging spectrometry for surveying and modelling land degradation. w: Imaging spectrometry. Basic Principles and Prospective Applications. FD. van Der Meer, and S.M. de Jong (eds). Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic: 65–86.
- 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.
- Keim, R. F., Skaugset A. E., Link T. E., Iroumé A. 2004. A stochastic model of throughfall for extreme events. *Hydrology and Earth System Sciences* 8: 23–34.
- 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
- Klaassen W., Lankreijer H. J. M., Veen A. W. L. 1996. Rainfall interception near a forest edge. *Journal of Hydrology* 185: 349–361
- Klamerus-Iwan A. 2010. Intercepcja wybranych gatunków drzew leśnych w warunkach badań laboratoryjnych. Rozprawa doktorska. Maszynopis w Katedrze Inżynierii Leśnej Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.
- Klamerus-Iwan A., Owsiak K. 2013. Ocena konstrukcji prototypowego stanowiska do badań nad intercepcją drzew leśnych w warunkach laboratoryjnych [Assessment of the design of the prototype experimental station for the research on forest trees interception in the laboratory conditions]. *Sylwan* 157(6): 464–469.
- Kołodziej J., Liniewicz K., Bednarek H. 2005. Intercepcja opadów atmosferycznych w łąkach zbóż [Rainfall interception in cereal fields]. *Acta Agrophysica* 6(2), 381–391
- Kowalik P. 1995. Obieg wody w ekosystemach lądowych. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, 9. Warszawa, Oficyna Wydawnicza PW, p. 84.

- Kuczka J. 2007. Właściwości hydrologiczne materii organicznej gleb leśnych na przykładzie gleb pod świerczynami istebniańskimi [Hydrological properties of organic matter of forest soils as exemplified by soils under Istebna stands of Norway spruce]. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie: Rozprawy*, 442, p. 320.
- Leonard R. E. 1967. Mathematical theory of interception. In: *Forest Hydrology*. W. E. Sopper and H. W. Lull (eds). Pergamon Press: 131–136.
- 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.
- Liu J. 1988. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modeling* 42: 111–123.
- Liu S. 1992. Predictive models of forest canopy interception. *Scientia Silvae Sinica*. 28: 445–449.
- Liu S. 1997. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecological Modeling* 99: 151–159.
- Llorens P., Poch R., Latron J., Gallart F. 1997. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. I. Monitoring design and results down to the event scale. *Journal of Hydrology* 199(3–4): 331–345.
- Loeschner 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: 397–407.
- Massman W. J. 1980. Water storage on forest foliage: a general model. *Water Resources Research* 16: 210–216.
- Massman W. J. 1983. The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forests. *Agricultural Meteorology* 28: 261–286.
- Merriam R. A. 1960. A note on the interception loss equation. *Journal of Geophysical Research* 65: 3850–3851.
- Miler A. 1994. Modelowanie matematyczne zdolności retencyjnych małych zlewni nizinnych [Mathematical modelling of retention capacities of small lowland catchment basins]. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy Naukowe*, 258.
- Miler A. T. 2008. Las i woda – zagadnienia wybrane [Forest and water – selected issues]. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej* 10, 2 (18): 24–32.
- Miler A. T., Okoński B., Grajewski S. 2001. Stosunki wodne w wybranych ekosystemach Puszczy Zielonka. Poznań, Wyd. Akademii Rolniczej.
- Molchanov A. A. 1960. *Gidrologicheskaya rol' lesa*. Moskva, Izdat. Akad. Nauk SSSR.
- Mulder J. P. M. 1985. Simulating interception loss using standard meteorological data. In: B.A. Huchison and B.B. Hicks (eds) *The Forest-Atmosphere Interaction*. Dordrecht, D. Reidel Publishing Company: 177–196.
- Nachorecka-Duda H., Ratomska B. 2002. Rola retencyjności roślinności niskiej w formowaniu odpływu [The role of low vegetation retention capacity in runoff generation]. *Las i Woda. Czasopismo Techniczne, Środowisko* 5: 111–118.
- Okoński B. 2007. Hydrological response to land use changes in central European lowland forest catchments. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 15,1: 3–13.
- Olszewski J. 1965. Pomiary opadu deszczu w grądzie w Białowieckim Parku Narodowym [Rainfall measurements in *Quercus-Carpinetum medioeuropaeum* Tuxen 1936 in Białowieża National Park]. *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 [Precipitation interception by beech and pine in Bieszczady Mts.]. *Sylwan* 10: 45–53.
- Orzeł W. 1980. Intercepcja opadów atmosferycznych w łąkach roślin uprawnych. Praca doktorska wykonana w Zakładzie Agrometeorologii Akademii Rolniczej w Lublinie.
- Ostrowski S. 1965. Wpływ opadów atmosferycznych i wód gruntowych na przyrost wysokości i grubości sosny polspolitej. Warszawa, IBL ZGW.
- Osuch B. 1994. Opad netto w drzewostanie na tle właściwości retencyjnych powierzchni roślin. *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Monografia* 166.
- Osuch B., Homa A., Feliks M. 2005. Opis pojemności zbiornika intercepcyjnego sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) [Description of interception storage of pine (*Pinus sylvestris*)]. *Czasopismo Techniczne. Środowisko*, 102, 10: 71–84.
- Osuch B., Homa A., Feliks M., Kulig M. 2005a. Zbiornik intercepcyjny brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth). *Czasopismo Techniczne. Środowisko*: 10: 103–118.
- Owsiak K., Klamerus-Iwan A., Gołąb J. 2013. Wpływ aktualnego stanu zraszanej powierzchni na przyleganie wody deszczowej w kontekście badań laboratoryjnych nad intercepcją drzew [Effect of current state of the sprinkled surface on rain water coherence – laboratory research on interception by trees]. *Sylwan* 157 (12): 922–928.
- 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.
- Putuhena W., Cordery I. 1996. Estimation of interception capacity of the forest floor. *Journal of Hydrology* 180: 283–299.
- Pypker T. G., Bond B. J., Link T. E., Marks D., Unsworth M. H. 2005. The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 130: 113–129.
- Ramirez A., Senarath A. S. 2000. A statistical-dynamic parameterization of interception and land surface-atmosphere interactions. *Journal of Climate* 13: 4050–4063

- Respondowski R. 1999. Laboratorium z fizyki. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Robin L. H. 2003. Interception loss as a function of rainfall and forest types: Stochastic modeling for tropical canopies revisited. *Journal of Hydrology* 280: 1–12.
- Rutter A. J., Kershaw K. A., Robins P. C., Morton J. 1971. A predictive model of rainfall interception in forests: I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology* 9: 367–384.
- Rutter A. J., Morton A. J., Robins P. C. 1975. A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology* 12: 367–380.
- Rutter, A. J., and A. J. Morton. 1977. A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. *Journal of Applied Ecology* 14:567–588.
- Seidl R., Eastaugh C.S., Kramer K. Maroschek M.; Reyer C; Socha J. et al. 2013 Scaling issues in forest ecosystem management and how to address them with models. *European Journal of Forest Research* 5-6: 653–666.
- Schulze R. E., Scott-Shaw C. R., Nanni U. W. 1978. Interception by *Pinus patula* in relation to rainfall parameters. *Journal of Hydrology* 36: 393–396.
- Soczyńska U. (ed.) 1997. Hydrologia dynamiczna. Warszawa, PWN. ISBN 83-01-12310-9.
- Stankiewicz H. 1971. Zabezpieczenie budowli przed wilgocią, wodą gruntową i korozją. Warszawa, Arkady.
- Suliński J. 1993. Modelowanie bilansu wodnego w wymianie między atmosferą, drzewostanem i gruntem przy użyciu kryteriów ekologicznych [Modelling water balance in the exchange between atmosphere, tree stand and soil using ecological criteria]. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, Rozprawy*, 179.
- Suliński J. 1995. Czynniki różnicujące wartości składowych bilansu wodnego drzewostanów zagospodarowanych zrębowo [Factors differentiating component values of water balance in tree stands managed with clearcutting methods]. *Sylwan* 139 (11): 49–65.
- Suliński J., Starzak R., Kucza J. 2001. Weryfikacja wzoru wyrażającego intercepcję drzew w zależności od natężenia i czasu trwania opadu deszczu, w warunkach eksperymentalnych. *Acta Agraria et Silvustria, Series Silvetris* 39: 3–16.
- Suliński J., Owsiak K. 2009. Premises for the construction of balance equations of water reserves in the saturation zone of forest soil. *Journal of Water and Land Development* 13b: 87–108.
- Suliński J., Starzak R. 2009. Premises for the construction of balance equations of water losses in mountain forest soils. *Journal of Water and Land Development* 13a: 329–344.
- Teklehaimanot Z., Jarvis P. G. 1991. Direct measurement of evaporation of intercepted water from forest canopies. *Journal of Applied Ecology* 28: 603–618.
- Toba T., Ohta T. 2005. An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests. *Journal of Hydrology* 313: 208–220.
- Toba T., Ohta T. 2008. Factors affecting rainfall interception determined by a forest simulator and numerical model. *Hydrological Processes* 22 (14): 2634–2643.
- Torres Sempere D., Porr J. M., Creutin J. D. 1994. A general formulation for raindrop size distribution. *Journal of Applied Meteorology* 33: 1494–1502.
- Tsukamoto Y., Tange I., Minemura T., 1988. Interception loss from forest canopies, *Rolling Land Research* 6: 60–82 [Japanese language, abstract in English].
- Uijlenhoet R., Stricker J. 1999. A consistent rainfall parametrization based on the exponential raindrop size distribution. *Journal of Hydrology* 218: 101–127.
- Yoshida H., Hashino M., Muraoka K. 1993. A method of estimating forest rainfall interception by tank model based on stem flow data. *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources* 6: 19–30 [w jęz. japońskim, z angielskim abstraktem].
- Yulianur A., Yoshida H., Hashino M. 1998. The estimation of rainfall interception loss using Hamon's potential evaporation and linear regression. *Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources* 11: 141–149 [Japanese language, abstract in English].
- Zinke P. J. 1967. Forest interception studies in the United States. In: W. E. Sopper and H. W. Hull (eds) *Forest Hydrology*. Oxford, Pergamon Press.
- Zeng N., Shuttleworth J. W., Gash J. 2000. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. *Journal of Hydrology* 228 (3–4): 228–241.