

JÓZEF SULIŃSKI, RAFAŁ STARZAK

Wybrane aspekty badania długoterminowych cykli zmian zapasu wody glebowej w drzewostanach jednogeracyjnych

Selected aspects of the study of long-term cycles of changes in the soil water storage in single generation stands

ABSTRACT

Suliński J., Starzak R. 2019. Wybrane aspekty badania długoterminowych cykli zmian zapasu wody glebowej w drzewostanach jednogeracyjnych. Sylwan 163 (3): 216-227. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2018099>.

This article describes cyclic changes in the soil water storage that take place within developmental stages of the stands managed by clear-cutting system. The aim of the paper is to present possibilities of studying these changes and their significance for the dynamics of waterlogging of forest ecosystems and water outflow from the forest. Soil water storage (SWS) in forest soils undergoes cyclic changes that can be divided into short-term, seasonal and long-term. Short-term changes, calculated on a daily basis, and seasonal, covering the entire growing season, can be identified and analyzed based on stock values measured over relatively short periods. Studying long-term cycles in this way is practically impossible, as there are no long-term measuring sequences. However, it is possible to use water-balance equilibrium in atmosphere-stand-soil (A-D-G) for this purpose. The dependent variables include increments of soil water storage, while independent ones are represented by the biometric features of stands and hydro-climatic factors. The balance equations should be built separately for SWS supply and losses. In the recharge phase the increase of the SWS after single rainfall, the amount of potential interception proportional to the plant surface and the weight of the forest litter as well as rainfall intensity and duration, which determine the level of its use are taken into account. SWS losses are explained by the rates of plant transpiration, linearly dependent on the amount of biomass produced and evaporation from the soil surface, which is a function of the amount of solar energy and wind velocity within the stand. They are modulated in relation to the conditions above the canopy that in turn depend on biometric characteristics of the stand. Taking into account the hydro-climatic conditions above the canopy ensures that the *ceteris paribus* condition is met. Recognition of long-term SWS cycles is possible due to the knowledge of stand dynamics manifested by changes in the value of its biometric features. The identification of equations according to the above-mentioned indications was carried out many times with very high compliance in the conditions of even-aged low-energy stands. The occurrence of long-term SWS cycles raises a number of questions regarding the forest ecosystem functioning, description of forest sites, silvicultural systems applied as well as the ability to control the water balance in forest ecosystems. The hydrological conditions in the forest ecosystem are shaped mostly upon selecting silvicultural system to be implemented. It results in specific changes in biometric features in the subsequent stand development stages modulating the components of the A-D-G balance and, as a consequence, soil water relations. The impact of ongoing stand tending is limited. However, forest drainage, tree felling uncovering soil surface and sudden changes in the forest structure triggered by abiotic and biotic factors, may produce significant effects.

KEY WORDS

forest water balance; forest soil water storage; water balance equation, atmosphere-forest-soil model

ADDRESSES

Józef Suliński – e-mail: rlsulins@cyf-kr.edu.pl

Rafał Starzak – e-mail: r.starzak@urk.edu.pl

Zakład Inżynierii Leśnej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

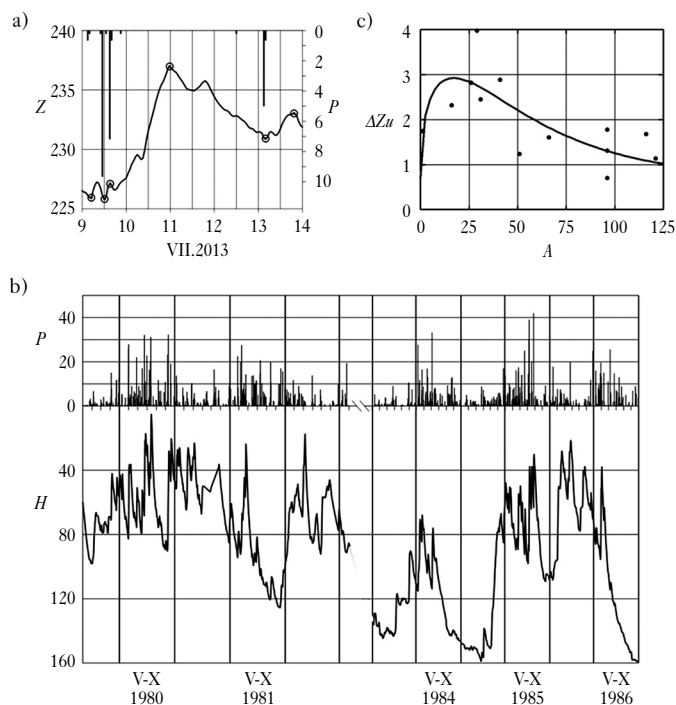
Wstęp

Przedmiotem opracowania są długoterminowe cykle zmian zapasu wody glebowej zachodzące w skali faz rozwojowych drzewostanów zagospodarowanych sposobem zrębowym. Celem pracy jest przedstawienie niektórych wskazań metodycznych ich badania oraz znaczenia w kontekście kształtowania się uwilgotnienia siedlisk leśnych i odpływu wody z lasu.

Zapaszem wody glebowej nazywana jest ilość wody znajdującej się w pokrywie glebowej, w strefach aeracji i saturacji łącznie, wyrażona w milimetrach warstwy wody. Odpowiada to stosowanemu w opracowaniach hydrologicznych pojęciu retencji strefy podziemnej, na którą składają się retencja strefy aeracji oraz retencja strefy saturacji. Pierwsza jest też nazywana zapaszem wilgoci glebowej lub wodą glebową, druga natomiast retencją gruntową [Somorowska 2007]. W glebach leśnych zapas wody jest wynikiem bilansu wodnego atmosfera-drzewostan-gleba (dalej A-D-G), odnoszącego się do poziomu ekosystemu leśnego [Suliński 1993].

Wartości zapasu zmieniają się w cyklach, które można podzielić na krótkoterminowe, sezonowe oraz długoterminowe (ryc. 1). W okresach bez pokrywy śnieżnej czas trwania cyklu krótkoterminowego zależy wprost od warunków pogodowych, zazwyczaj jest to kilka do kilkudziesięciu godzin dla fazy zasilania oraz kilka do kilkunastu dni dla fazy ubytków (ryc. 1a).

Cyklami sezonowymi (ryc. 1b) nazywane są zmiany występujące głównie w związku z warunkami pogodowymi typowymi dla kolejnych pór roku [Boczoń 2008; Grajewski i in. 2013; Korytowski 2013]. Stwierdzono także równorzędny wpływ postaci drzewostanu [Molchanov 1953; Bielecki 1964, 1968; Suliński 1981]. Cykle długoterminowe (ryc. 1c) wiążą się ze zmianami postaci drzewostanu w kolejnych fazach rozwojowych. Ich występowanie można obserwować bezpośrednio na niektórych zrębach, w sytuacji klęski żywiołowej czy też gradacji. Świadczą o nich także wyniki porównań głębokości zwierciadła wody gruntowej przed usunięciem drzewostanu i po jego usunięciu [Heikurainen 1967; Korytowski 2013]. Grajewski i in. [2013] wieloletni trend wzrostowy głębokości zwierciadła wody gruntowej wiązali z trendami opadu atmosferycznego oraz temperatury powietrza. W badaniach własnych autorzy stwierdzili, że cykle długoterminowe są *ceteris paribus* następstwem głównie dynamiki drzewostanu [Kucza, Suliński 1987; Suliński 1990, 1993]. Przytoczone opinie potwierdzają sam fakt występowania cykli długoterminowych, jednocześnie wskazują na konieczność pogłębienia znajomości ich przyczyn i wartości liczbowych. Cykle dobowe i sezonowe można wyodrębnić i porównywać, analizując stosunkowo krótkie ciągi pomiarowe. Badanie tym sposobem cykli długoterminowych jest praktycznie niemożliwe, brakuje bowiem wieloletnich pomiarów spełniających zasadę *ceteris paribus* ze względu na warunki drzewostanowe oraz czynniki pogodowe, można natomiast wykorzystać w tym celu równania bilansu wodnego A-D-G. Znaczenie występowania cykli długoterminowych jest istotne zarówno z punktu widzenia funkcjonowania lasu, jak i bilansu wodnego zlewni hydrologicznych.



Ryc. 1.

Przykłady dobowych (a) [Starzak 2016], sezonowych (b) [Suliński, Starzak 2009] oraz długoterminowych (c) cykli zmian zapasu wody glebowej w skali faz rozwojowych drzewostanu sosnowego Lasy Wierchostawickie

Examples of (a) daily [Starzak 2016], (b) seasonal [Suliński, Starzak 2009] and (c) long-term cyclic changes in the soil water storage depending on the stage of development phase of the Scots pine stand in Wierchostawice Forests

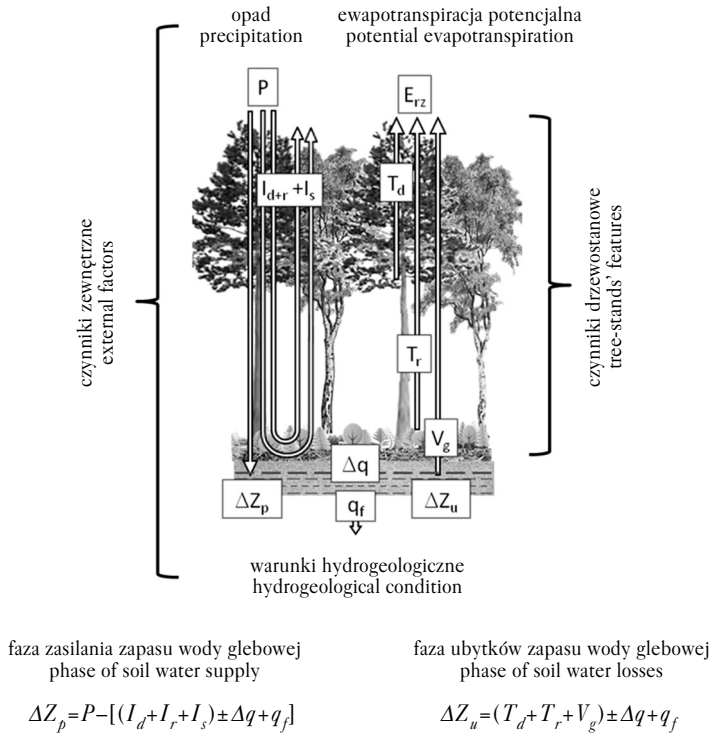
Z – zapas wody glebowej [mm], P – wysokość pojedynczego opadu deszczu [mm], H – głębokość swobodnego zwierciadła wody gruntowej [cm], ΔZ_u – średni dobowy ubytek zapasu wody glebowej [mm], A – wiek drzewostanu [lata], \odot – punkty wyznaczające fazy przyrostów i ubytków zapasu wody glebowej

Z – soil water storage [mm], P – precipitation recorded during single rainfall [mm], H – depth of free groundwater table [cm], ΔZ_u – average daily decrease in the soil water storage [mm], A – stand age [years]; \odot – points marking declines and increases in the soil water storage

Przesłanki badania cykli zmian zapasu wody glebowej

Głównym wyróżnikiem stosunków wodnych ekosystemu leśnego jest dynamika zapasu wody w profilu glebowym. W opisywanej metodyce sumowane są zapasy mierzone jednocześnie w kilku warstwach, wyodrębnionych według właściwości fizycznych gruntu.

Porównywanie zapasu wody w czasie i w różnych profilach glebowych wymaga rozdzielania wpływu czynników zewnętrznych od drzewostanowych (ryc. 2). Do pierwszych należą opad atmosferyczny i ewapotranspiracja potencjalna nad koronami drzew oraz warunki hydrogeologiczne. Drugie są związane z oddziaływaniem drzewostanu. Czynniki zewnętrzne są niezależne od działalności gospodarczej, wewnętrzne mogą być modulowane przez gospodarkę leśną oraz czynniki biotyczne i abiotyczne. Warunek rozdzielania wpływu wymienionych czynników spełniają regresyjne równania bilansowe A-D-G, w których zróżnicowanie składowych jest wyrażone za pomocą cech biometrycznych drzewostanów. Pozwalają więc na ocenę, w jakim stopniu czynności gospodarcze oraz czynniki biotyczne i abiotyczne modulujące cechy drzewostanu mogą zmieniać stosunki wodne ekosystemu leśnego. Ich analiza może być także pomocna w poszu-



Ryc. 2.

Schemat bilansu wodnego atmosfera-drzewostan-gleba [Suliński 1993]

Soil water balance atmosphere-tree-stand-soil [Suliński 1993]

ΔZ_p – przyrost zapasu wody glebowej po opadzie deszczu P; I – intercepcja; d+r – drzew i runa, s – ściółki; Δq – zmiana zapasu wody w glebie w wyniku różnicy dopływu i odpływu wody po powierzchni i gruncem; q_f – infiltracja poniżej profilu, dla którego jest sporządzany bilans wody glebowej; ΔZ_u – ubytek zapasu wody glebowej; E_{rz} – ewapotranspiracja rzeczywista nad koronami drzew; T – transpiracja: d – drzew, r – runa; V_g – parowanie z powierzchni gleby (poniżej ściółki)

ΔZ_p – increase of the soil water storage after precipitation P; I – interception; d+r – trees and ground vegetation, s – litter; Δq – change in the soil water storage resulting from the difference in surface and underground water inflow and outflow; q_f – infiltration below the profile for which soil water balance was prepared; ΔZ_u – losses in the soil water storage; E_{rz} – actual evapotranspiration above tree-stand canopy; T – transpiration: d – trees, r – ground vegetation; V_g – evaporation from the soil surface (below the litter layer)

kiwaniu odpowiedzi na kluczowe pytanie: czy i w jakim stopniu, podejmując określone czynności gospodarcze w lesie, można sterować jego bilansem wodnym? Odpowiedź na to pytanie warunkuje realizację większości postulatów stawianych gospodarce leśnej w zakresie kształtowania hydrologicznych funkcji lasu [Pierzgalski 2008].

Do budowy i identyfikacji równań parametrycznych w oparciu o ogólne równania bilansowe (ryc. 2) najbardziej przydatne są pomiary z krokiem czasowym rzędu kilku-kilkunastu godzin. Możliwe jest wówczas rozdzielenie faz zasilania i ubytków zapasu wody glebowej (ryc. 1a) oraz obliczenie dla nich sumy wszystkich zmian w poszczególnych fazach. Wydłużenie kroku czasowego ogranicza obliczenia zmian zapasu do różnic między wartościami z poszczególnych terminów pomiarowych.

W większości zastosowań praktycznych można pominąć w równaniach bilansowych zmiany zapasu związane z przepływem „poziomym” (ryc. 2). Spływ po powierzchni gleby pokrytej materią organiczną nie występuje, zaś przepływ gruntem odbywa się ruchem *quasi* ciągłym. Można również pominąć infiltrację w profilach ze strefą saturacji oraz w tych, gdzie na większych głębokościach dynamika zapasu wody zanika. Nie można jej natomiast pominąć w glebach górskich,

co bardzo utrudnia identyfikację równań dla fazy zasilania [Kucza i in. 2005; Starzak i in. 2015].

Szczególną cechą zbiorowiska leśnego jest zdolność „wypełniania przestrzeni ekologicznej” [Suchecky 1953]. Jej wynikiem jest gęstość objętościowa drzewostanu, obliczona jako stosunek masy nadziemnych części wszystkich roślin do objętości zajmowanej przez nie przestrzeni, licząc od powierzchni gleby do wierzchołków drzew [Suliński 1997]. Można przyjąć, że istnieje wartość normalna tej gęstości, gdy ilość biomasy skumulowanej na gruncie jest na granicy naturalnego wydzielania się drzew [Jaworski 2004, 2011]. Stanowi ona odniesienie dla gęstości aktualnej, przydatnej do określania zróżnicowania warunków przenoszenia energii i osłabiania prędkości wiatru wewnątrz drzewostanu.

W zbiorowisku leśnym utrzymuje się *quasi* stała roczna produkcja masy nadziemnych części roślin, którą można oszacować na przykład w proporcji do bonitacji drzewostanu [Suliński 2007]. Skutkuje ona cyklicznymi zmianami masy runa [Szymański 1986; Gabeyev 1990] i tym samym stopnia osłonięcia gleby modulującego parowanie z jej powierzchni.

FAZA ZASILANIA. O tym, jaka część opadu deszczu nad koronami drzew zasila zapas wody glebowej, decydują głównie intercepcja szaty roślinnej i ściółki. Intercepcję pojedynczego opadu deszczu można przedstawić jako „proces napełniania nieszczelnego zbiornika” [Suliński 1993; Suliński i in. 2001]. Wyróżniana jest intercepcja potencjalna i rzeczywista.

Intercepcja potencjalna drzew i runa zależy głównie od cech lasu, zwłaszcza od wielkości powierzchni roślin i ich zdolności zatrzymywania wody, którą za Czarnowskim [1989] można nazwać „przylepnością deszczową”. Intercepcja potencjalna ściółki, zdefiniowanej jako materia organiczna o gęstości objętościowej poniżej $0,45 \text{ g/cm}^3$ [Suliński 1993], jest głównie funkcją jej masy oraz zawartości wody w chwili rozpoczęcia się opadu deszczu. Napełnienie „nieszczelnego zbiornika”, za jaki można obrazowo uznać powierzchnię roślin i ściółki, wymaga deszczu z odpowiednio wysokim natężeniem i czasem trwania. Na przykład w warunkach eksperymentu laboratoryjnego pełne wykorzystanie intercepcji potencjalnej ściółki leśnej zraszanej symulowanym ciągłym opadem deszczu o natężeniu 14 mm/h nastąpiło dopiero po kilkudziesięciu godzinach [Kucza, Suliński 1990]. W analogicznym eksperymencie z małymi drzewkami świerka i buka symulowany opad o natężeniu rzędu 10 mm/h nie był w stanie wypełnić ich intercepcji potencjalnej przez ponad 2 godziny [Suliński i in. 2001]. W warunkach Polski deszcze spełniające jednocześnie obydwie warunki występują rzadko, dlatego wartości intercepcji rzeczywistej zazwyczaj w większym stopniu zależą od ich charakterystyk niż od cech lasu określających pojemność umownego zbiornika intercepcyjnego.

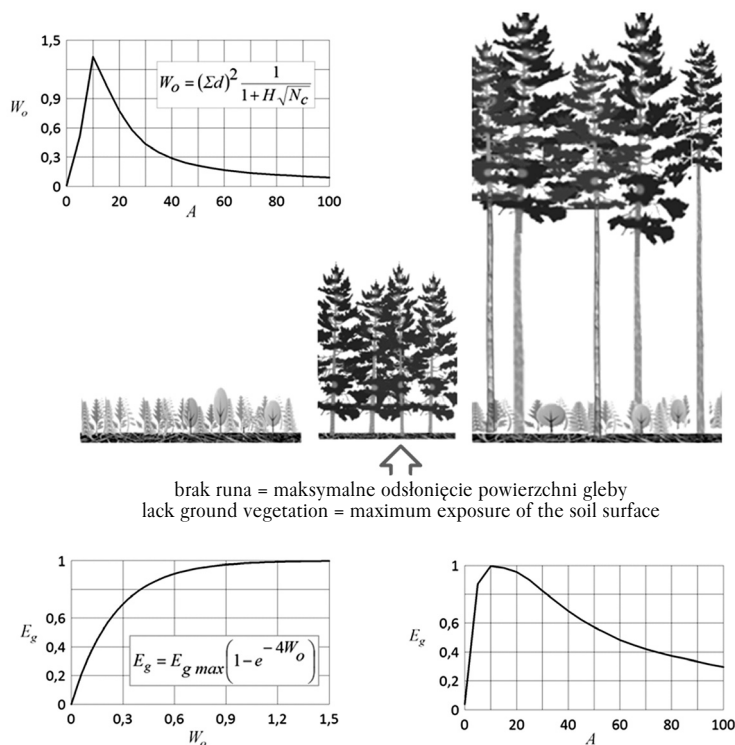
FAZA UBYTKÓW. Ubytki zapasu wody glebowej są związane z procesem transpiracji i parowania z powierzchni gleby (ryc. 2). Na poziomie ekosystemu leśnego sumaryczna transpiracja jest wprost proporcjonalna do ilości wyprodukowanej biomasy. W pierwszym przybliżeniu wynosi ona $160 \text{ g H}_2\text{O/g}$ wyprodukowanej świeżej masy nadziemnych części roślin [Suliński 1993; Suliński, Starzak 2009]. Wartość tę nazwano siedliskowym współczynnikiem transpiracji, w odróżnieniu od gatunkowego współczynnika transpiracji dla roślin rosnących pojedynczo. Jest to dobrze ugruntowana hipoteza, wpisująca się w znaną zasadę Czarnowskiego [1989], „zmienność zmniejsza się w miarę przesuwania się na wyższe poziomy organizacji materii”, z której wynika, że cechy gatunkowe mogą ustępować cechom zbiorowości.

Ubytki zapasu wody glebowej w największym stopniu są różnicowane przez parowanie z powierzchni gleby. Jego wielkość zależy głównie od energii promieniowania słonecznego i prędkości wiatru bezpośrednio nad parującą powierzchnią. Obydwa te czynniki są wewnątrz drzewostanu zredukowane w stopniu zależnym od wartości cech biometrycznych.

Oslabienie energii wewnątrz drzewostanu można opisać wzorem opartym na prawie Beera dla silnie rozcieńczonych roztworów [Suliński 1993; Suliński, Sypka 2000], zaś osłabienie prędkości wiatru wzorem zbudowanym przez analogię do przepływu wody w zarośniętym korycie [Czarnowski 1989; Suliński 1993; Sypka, Starzak 2013]. W rezultacie otrzymuje się wzór wyrażający stopień odsłonięcia powierzchni gleby w drzewostanie, w zależności od jego cech biometrycznych [Suliński 1993] (ryc. 3).

Obliczając całkowite wyparowanie wody ze zbiorowiska leśnego, należy do transpiracji i parowania z gleby dodać ilość wody, która została zatrzymana na powierzchni roślin i ściółki w procesie intercepcji (ryc. 2).

W oparciu o przedstawione założenia opracowano równania bilansowe dla fazy przyrostów i ubytków zapasu wody glebowej dla kilkudziesięciu drzewostanów w lasach nizinnych oraz ubytków w lasach nizinnych i górskich [Suliński 1993; Suliński, Owsiak 2009; Suliński, Starzak 2009]. Wiążą one wartości składowych bilansu A-D-G z cechami biometrycznymi drzewostanów jednogeneracyjnych z bardzo wysoką zgodnością, toteż zostały wykorzystane do badania występowania cykli długoterminowych. Pozytywne wstępne wyniki identyfikacji równań otrzymano również dla drzewostanów wielogeneracyjnych [Suliński i in. 2014; Starzak 2016].



Ryc. 3.

Liczbowe ujęcie stopnia odsłonięcia i parowania z powierzchni gleby w drzewostanie [Suliński 1993]

Numerical recognition of the degree of surface exposure to and evaporation from the soil surface in a tree-stand [Suliński 1993]

W_o – wskaźnik odsłonięcia powierzchni gleby (poniżej ściółki); Σd – suma pierśnic drzew [100 m/ha]; H – wysokość drzewostanu; N_c – liczba drzew [tys./ha]; E_g – parowanie z powierzchni gleby (poniżej ściółki) w stosunku do nagiej gleby $E_{g \max}$; A – wiek drzewostanu [lata]; W_o – indicator of soil surface exposure (below the litter layer); Σd – sum of diameters at breast height [100 m/ha]; H – tree-stand height [m]; N_c – number of trees [$\times 1000$ /ha]; E_g – evaporation from the soil surface (below the litter layer) as compared to bare soil $E_{g \max}$ [mm]; A – stand age [years]

Niektóre zagadnienia związane z występowaniem cyklicznych zmian zapasu wody glebowej w skali faz rozwojowych drzewostanu

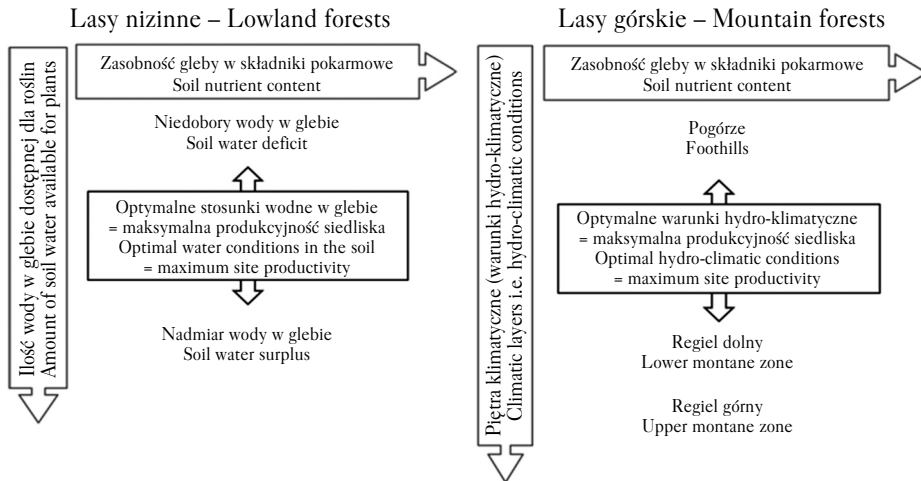
Występowanie cykli zmian zapasu wody glebowej nasuwa szereg pytań dotyczących funkcjonowania i opisywania siedlisk leśnych, postępowania hodowlanego i jego wpływu na bilans wodny ekosystemu, a w konsekwencji na odpływ wody z lasu.

KONTEKST SIEDLISKOWY. Rodzą się tu trzy grupy pytań. Pierwsza dotyczy zagadnienia, w jakim stopniu warunki wilgotnościowe gleb zdiagnozowane w jednej fazie rozwojowej drzewostanu można odnieść do innych faz, skoro występują długoterminowe cykle zmian zapasu wody glebowej (ryc. 1c). Pełną diagnostykę siedlisk leśnych przeprowadza się bowiem na powierzchniach podstawowych zlokalizowanych w drzewostanach starszych klas wieku, w innych fazach rozwojowych wyznaczane są jedynie powierzchnie pomocnicze z okrojonym programem badań [Instrukcja... 2012]. Wpływ wody glebowej na warunki bytowania roślin jest oceniany przez interpretację widocznych skutków jej występowania. Dla gleb ze strefą saturacji podaje się wprawdzie głębokość zwierciadła wody gruntowej, lecz pomierzoną jednorazowo i odniesioną do okresu wiosennego. W oparciu o tak zebrane dane bardzo trudno byłoby uchwycić długoterminowe cykle zmian zapasu wody glebowej oraz ich relacje z czynnikami drzewostanowymi, nawet gdyby procedury diagnozowania siedliska zobowiązywały do takiej oceny.

Druga grupa pytań dotyczy określania stanu siedliska leśnego, traktowanego jako uszczegółowienie kryteriów do ustalania grupy i wariantu uwilgotnienia, zwłaszcza siedlisk zniekształconych lub przekształconych na skutek zmiany stosunków wodnych [Instrukcja... 2012]. Zmiany te mogą być następstwem długoterminowych cykli zapasu wody glebowej związanych z dynamiką drzewostanu, które w diagnozowaniu siedlisk leśnych nie są uwzględniane, chociaż dostrzegane. Kabała i Marzec [2016] zwracają uwagę, że diagnozę siedliskową stawia się w układzie statycznym, zakładając brak istotnych zmian w okresie jej obowiązywania, natomiast odwodnione siedliska są układami dynamicznymi [Cieśla 2009], czego rezultatem jest obserwowana niezgodność niektórych stałych i zmiennych elementów branych pod uwagę w pracach siedliskowych [Wanic i in. 2011]. Kabała i Marzec [2016] wyrażają więc pogląd, że należy rozstrzygnąć, czy diagnoza stanu siedliska ma opisywać stan aktualny, czy raczej uwzględnić zapoczątkowany kierunek przeobrażeń i prognozować zmianę wariantu wilgotnościowego siedliska w okresie objętym planowaniem.

Trzecia grupa pytań dotyczy melioracji leśnych rozpatrywanych z punktu widzenia funkcjonowania siedlisk leśnych. Kluczową kwestią warunkującą ich podjęcie i następnie ocenę skuteczności jest ustalenie kryteriów, w jakim stopniu aktualne stosunki wodno-glebowe odbiegają od uznawanych za właściwe. W tym celu, kierując się definicją siedliskowego typu lasu i gospodarczego typu drzewostanu [Zasady... 2012], można poddać myśl zdefiniowania pojęcia „optymalne stosunki wodno-glebowe” w dwóch kategoriach. Do pierwszej można byłoby zaliczyć te cechy profilu glebowego, od których zależy maksymalne wykorzystanie trofizmu gleby, do drugiej – czynniki kształtujące skalę zdolności przystosowania się drzewostanu do warunków siedliskowych [Suliński, Jaworski 1998] (ryc. 4).

KONTEKST HODOWLANY. W hodowli lasu rozważane jest zagadnienie stabilności drzewostanów na tle szerzej definiowanej problematyki stabilności ekosystemu leśnego [Jaworski 2011]. W tym kontekście uzasadnione byłoby doprecyzowanie pojęcia stabilności stosunków wodno-glebowych siedliska leśnego ocenianej według zakresu i czasu trwania zmian zapasu wody glebowej. Do stabilnych zaliczane byłyby siedliska, w których zmiany mieszczą się w wartościach od maksymalnej do minimalnej dla cykli dobowych, ewentualnie sezonowych. Zmiany zapasu przekra-



Ryc. 4.

Optymalne stosunki wodne a maksymalna produktywność siedliska
Optimal water conditions and maximum site productivity

czające te granice można byłoby traktować jako przejaw potencjalnie niestabilnych stosunków wodno-glebowych, niezależnie od przyczyny ich wystąpienia.

Cykle długoterminowe są wynikiem procesów rozłożonych w czasie, dlatego ich skutki są trudne do śledzenia. Jeżeli systemy korzeniowe roślin sięgają strefy saturacji, to w miarę czytelny obraz zmian zapasu wody w całym profilu glebowym można otrzymać przez stosunkowo łatwe do wykonania pomiary głębokości zwierciadła wody gruntowej, bowiem wartości zapasu w strefie aeracji pozostają z nimi w zależności liniowej [Kucza, Suliński 1987; Korytowski i in. 2015]. W innych warunkach wymaga to specjalistycznych, trudnych metodycznie i organizacyjnie badań. W żadnym przypadku nie można jednak założyć, że w glebach bez strefy saturacji długoterminowe cykle i ich skutki nie występują.

W badaniach naukowych problematyka cykli zmian zapasu wody glebowej w skali faz rozwojowych drzewostanu nie jest szerzej rozwijana. W praktyce leśnej można ją dostrzec we wskazaniach postępowania hodowlanego [Zasady... 2012], na przykład dotyczących sposobu prowadzenia prac zrębowych na terenach zagrożonych zabagnianiem się. Zaleca się tam planowanie kilku nawrotów cięć w celu uniknięcia gwałtownego wzrostu wilgotności gleby utrudniającego prace zrębowe, a następnie odnowieniowe. Wzrost wilgotności gleby jest wynikiem wielokrotnego osłabienia parowania z jej powierzchni na zarastającym zrębie. Po jego odnowieniu runo z roku na rok zanika i parowanie z odsłaniającej się powierzchni gleby rośnie, osiągając maksimum w fazie młodnika (ryc. 3). Gdy po kilkunastu latach na zabagniającym się zrębie następuje przesuszenie gleby pod młodnikiem, trudno jest to skojarzyć ze zmieniającą się postacią drzewostanu. Przeciwdziałanie temu procesowi wymagałoby rozrzedzenia młodnika do więźby umożliwiającej ponowne zarośnięcie gleby runem, lecz takiego postępowania zasady hodowlane nie przewidują. Należy dodać, że w każdej fazie rozwojowej drzewostanu może wystąpić efekt skokowego wzrostu ilości runa z konsekwencjami dla stosunków wodnych w glebie, na przykład w wyniku pożaru, wiatrołomów czy gradacji.

CZY MOŻNA STEROWAĆ BILANSEM WODNYM EKOSYSTEMU LEŚNEGO? Wśród postulatów dotyczących hydrologicznych funkcji lasu na czołowym miejscu wymienia się retencję wyrównującą

odpływ wody ze zlewni [Pierzgalski 2008; Miler 2008]. Nasuwa się pytanie, czy przez zabiegi hodowlane można modulować składowe bilansu A-D-G poszczególnych ekosystemów leśnych, a tym samym odpływ wody ze zlewni będący ich wypadkową.

Zmienność wartości składowych bilansu A-D-G jest kształtowana głównie przez dynamikę drzewostanu, czyli zmieniające się w czasie wartości jego cech biometrycznych. Jest ona przede wszystkim następstwem przyjętego sposobu zagospodarowania. Wpływ zabiegów hodowlanych, głównie rodzaju i intensywności cięć pielęgnacyjnych oraz rodzaju i formy rębni, można traktować jako czynnik dodatkowy.

W tabeli zestawiono ocenę podatności głównych składowych bilansu A-D-G na zmiany postaci drzewostanów opracowaną na podstawie analizy równań bilansowych dla kilkudziesięciu drzewostanów jednogeneracyjnych na niżu, pogórzu i w górach. Zwrócono uwagę na rolę produktywności siedliska, która jest wprawdzie praktycznie niezależna od bieżących zabiegów hodowlanych, może być natomiast modulowana przez długoterminowe zmiany zapasu wody glebowej. Następuje wówczas sprzężenie zwrotne – zmiana produktywności siedliska moduluje cechy biometryczne drzewostanu, które były jej przyczyną. W ocenie pominięto ewentualne działanie czynników biotycznych i abiotycznych oraz melioracji leśnych.

W matematycznych modelach zlewni oddziaływanie lasu jest analizowane jako czynnik kształtujący wartości składowych hydrogramu odpływu. Wartości te są średnimi dla całej zlewni, czyli nie mają bezpośredniego przełożenia na wartości składowych bilansu A-D-G poszczególnych ekosystemów leśnych. Dlatego wyniki analizy hydrogramu nie stanowią wystarczającej podstawy do oceny, w jakim stopniu działania gospodarcze modulujące stosunki wodne ekosys-

Tabela.

Uogólniona ocena podatności składowych bilansu wodnego atmosfera-drzewostan-gleba na zmiany stanu roślinności leśnej.

General assessment of the susceptibility of water balance components (atmosphere, tree stand and soil) to changes in the forest stand structure.

Rodzaj procesu Process	Podatność na zmiany postaci drzewostanu Susceptibility to changes in the forest stand structure
Intercepcja potencjalna (maksymalnie możliwa) wszystkich roślin ujęta razem Potential interception (maximum possible) of all plants captured together	Brak podatności, zależna od produktywności siedliska Lack of susceptibility, depending on the site productivity
Intercepcja potencjalna (maksymalnie możliwa) ściółki Potential interception (maximum possible) of litter	Podatna, zmiany należy obserwować w skali co najmniej kilku lat Susceptible, changes should be observed on a scale of at least a few years
Transpiracja ujęta razem dla wszystkich roślin w zbiorowisku leśnym Transpiration included together for all plants in the forest community	Brak podatności, zależna od produktywności siedliska Lack of susceptibility, depending on the site productivity
Parowanie z powierzchni gleby (poniżej ściółki) Evaporation from the soil surface (below the litter layer)	Silnie podatne, zmiany następują równocześnie ze zmianami postaci drzewostanu Highly susceptible, changes occur simultaneously with changes in the tree-stand developmental stage
Zdolność infiltracyjna pokrywy glebowej Soil infiltration capacity	Brak udokumentowanych danych; jeśli podatne, to zmiany należy obserwować w skali co najmniej kilku lat
Maksymalna pojemność wodna pokrywy glebowej Maximum soil water capacity	No documented data, if susceptible, changes should be monitored on a scale of at least a few years

temu leśnego przenoszą się na bilans wodny całej zlewni, nawet w przypadku zlewni całkowicie zalesionych.

Skoro długoterminowe cykle zmian zapasu wody glebowej są głównie następstwem dynamiki drzewostanu, to należy przyjąć, że retencja i odpływ wody z lasu wykazują nie tylko zróżnicowanie na obszarze zlewni, ale także zmienność w czasie. Jak dotąd nie jest to uwzględniane w modelach matematycznych zlewni, a podejmowane w tym zakresie próby [Okoński 2006; Okoński, Miler 2010] nie są szerzej rozwijane. Trudności w rozwiązaniu zarysowanego problemu są prawdopodobnie jedną z głównych przyczyn pomijania wpływu pokrycia zlewni lasem we współczesnych wzorach do inżynierskich obliczeń hydrologicznych [Punzet 1981] lub stosowania współczynników o bardzo zawężonej treści przyrodniczej [Stachý, Fall 1986].

Podsumowanie

Długoterminowe cykle zapasu wody glebowej w drzewostanach jednogeneracyjnych są następstwem zmian ich postaci w kolejnych fazach rozwojowych, będących głównie efektem przyjętego sposobu zagospodarowania. Cykle te mają kluczowe znaczenie dla stabilności uwilgotnienia siedlisk leśnych, postępowania hodowlanego oraz użytkowania lasu na terenach zagrożonych zabagnianiem się zrębów.

Ilościowe ujęcie długoterminowych cykli zmian zapasu wody glebowej jest możliwe w oparciu o równania bilansu wodnego A-D-G ułożone oddzielnie dla okresów zasilania i ubytków zapasu wody glebowej. Ich istotą jest wyrażenie zmienności składowych bilansu A-D-G za pomocą wartości cech biometrycznych drzewostanu, z uwzględnieniem czynników zewnętrznych, głównie opadu i zdolności suszącej powietrza nad koronami drzew. Analiza tak przygotowanych równań jest praktycznie jedyną metodą badania zmian zapasu wody glebowej spełniającą w pełni zasadę *ceteris paribus*, włączając w to także diagnozowanie skutków ewentualnego działania czynników biotycznych i abiotycznych oraz melioracji leśnych.

Wzorcem badania cykli długoterminowych mogą być opublikowane przez autorów w innych pracach równania bilansowe opisujące zmiany zapasu wody w kilkudziesięciu profilach glebowych w lasach nizinnych, na pogórzu i w górach. Wykorzystano do ich budowy dobrze ugruntowane wzory empiryczne wiążące komponenty bilansu A-D-G z wartościami cech biometrycznych drzewostanu. Wilgotność potrzebną do obliczenia zapasu wody glebowej pomierzono metodą elektrooporową, chociaż ma ona pewne ograniczenia i wymaga dalszego doskonalenia. Równania uwzględniają warunki hydroklimatyczne nad koronami drzew.

Analiza równań bilansowych A-D-G pozwala obiektywnie ocenić, w jakim zakresie możliwe jest sterowanie bilansem wodnym ekosystemów leśnych przez zabiegi hodowlane. Informacje te przeniesione na poziom całej zlewni stanowią istotę relacji las-odpływ wody. Tęgo zadania nie spełnia większość współcześnie budowanych modeli matematycznych zlewni, w których wpływ pokrycia lasem jest opisywany ogólnymi parametrami fizjograficznymi (o wartościach stałych w czasie) lub zgoła pomijany.

W drzewostanach wielogeneracyjnych występowanie i znaczenie długoterminowych cykli zmian zapasu wody glebowej nie są dotąd w pełni poznane. Kwestia ta powinna być pilnie podjęta, zwłaszcza w lasach górskich, w których prowadzona jest przebudowa, a którym przypisuje się szczególne znaczenie wodochronne.

Literatura

- Bielecki H. 1964. Badanie zasięgu oddziaływania rowu otwartego na stan wody w glebie leśnej w zależności od głębokości rowu. PTPN, Prace Kom. Nauk Roln. i Leśn. 17 (2).
- Bielecki H. 1968. Limnigraficzna metoda badania dynamiki wód glebowo-gruntowych. Zesz. Nauk. WSR w Krakowie, Rozpr. 10.

- Boczoń A. 2008. Położenie lustra wód gruntowych w północnej części Puszczy Białowieskiej w okresie po napelnieniu zbiornika „Siemianówka”. *Leś. Pr. Bad.* 69 (4): 355-363.
- Cieśla A. 2009. Wpływ zabudowy hydrotechnicznej Odry na zróżnicowanie fitosocjologiczne siedlisk łągowych kompleksu leśnego Prawików. *Leś. Pr. Bad.* 70 (2): 161-174.
- Czarnowski M. S. 1989. *Zarys ekologii roślin łągowych*. Wyd. II. PWN, Warszawa.
- Gabeyev W. N. 1990. *Ekologiya i produktivnost sosnovych lesov*. Nauka, Novosybirsk.
- Grajewski S., Miler A., Krysztofiak-Kaniewska A. 2013. Zmiany stanów wód gruntowych w Puszczy Zielonka w okresie 1970-2009. *Rocznik Ochrona Środowiska* 15: 1594-1611.
- Heikurainen L. 1967. Effect of Cutting on the Ground-water Level on Drained Peatlands. W: Sopper W. E., Lull H. W. [red.]. *International Symposium on Forest Hydrology*. Pergamon Press, Oxford. 345-354.
- Instrukcja urzędowania lasu. 2012. Cz. II. Instrukcja wyróżniania i kartowania w Lasach Państwowych typów siedliskowych lasu oraz zbiorowisk roślinnych. DGLP, Warszawa.
- Jaworski A. 2004. *Podstawy przyrostowe i ekologiczne odnawiania oraz pielęgnacji drzewostanów*. PWRiL, Warszawa.
- Jaworski A. 2011. *Hodowla lasu*. T. I. Sposoby zagospodarowania, odnawiania lasu, przebudowa i przemiana drzewostanów. PWRiL, Warszawa.
- Kabała C., Marzec M. 2016. Problemy diagnozowania typów siedliskowych lasu oraz określania stanu siedliska w lasach na terenach odwodnionych. W: Zielony R. [red.]. *Siedliska leśne zmienione i zniekształcone*. DGLP, Warszawa.
- Korytowski M. 2013. Analiza zmian stanów wód gruntowych po wycięciu drzewostanu w siedlisku lasu mieszanego wilgotnego na przykładzie Leśnictwa Łąki. *Ochrona Środowiska*, 15: 1274-1286.
- Korytowski M., Liberacki D., Stasik R. 2015. Zmiany stanów i zapasów wody wybranych siedlisk leśnych występujących w zlewni rzeki Niesób. *Inżynieria Ekologiczna* 44: 162-169.
- Kucza J., Starzak R., Suliński J. 2005. Wstępne wyniki pomiaru zapasu wody w glebie pod świerczynami istebniańskimi. *Czasopismo Techniczne* 10-Ś: 59-70.
- Kucza J., Suliński J. 1987. The utilization of ground-soil water in selected pine tree stands in the Niepołomice Forest. *Acta Agr. et Silv., ser. Silv.* 26: 45-59.
- Kucza J., Suliński J. 1990. Materiały do opisu fizjograficznego zalesionej części zlewni potoku Ratanica (0,88 km²). Raport etapowy CPBP 04.09.05.05. Maszynopis. Instytut Ekologii PAN.
- Miler A. 2008. Las i woda – zagrożenia wybrane. *Studia i Materiały CEPL* 18: 24-32.
- Molchanov A. A. 1953. *Sosnovyj les i vlaga*. Izdat. Akad. Nauk., Moskwa.
- Okoński B. 2006. Modelowanie odpływu bezpośredniego w zależności od stanów pokrycia zlewni leśnej. *AR Poznań. Rozprawy Naukowe* 374.
- Okoński B., Miler A. 2010. Adaptacja metody SCS-CN dla obliczania opadu efektywnego w zlewniach leśnych. W: *Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej*. T. 1. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN 68.
- Pierzgalski E. 2008. Relacje między lasem a wodą – przegląd problemów. *Studia i Materiały CEPL* 18: 13-23.
- Punzet J. 1981. Empiryczny system ocen charakterystycznych przepływów rzek i potoków w karpackiej części dorzecza Wisły. *Wiadomości IMGW* 27: 1-2.
- Somorowska U. 2007. Wpływ stanu retencji podziemnej na proces odpływu w zlewni nizinnej. Uniwersytet Warszawski, Warszawa.
- Stachý J., Fal B. 1986. *Zasady obliczania maksymalnych przepływów prawdopodobnych*. Prace Instytutu Badawczego Dróg i Mostów 3-4.
- Starzak R. [red.]. 2016. Zbadanie retencji wodnej drzewostanów górskich i podgórskich wytypowanych jako wzorcowe dla LKP Lasy Beskidu Sądeckiego oraz przyległych lasów podgórskich, w kontekście możliwości jej modulowania przez czynności gospodarcze. Sprawozdanie z 2 etapu badań zleconych (EO-2717-24/13MSK) przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych w Warszawie.
- Starzak R., Kucza J., Suliński J. 2015. Dynamika zapasu wody w glebach pod wybranymi drzewostanami świerkowymi Beskidu Śląskiego w latach 1999-2004. W: Małek S. [red.]. *Ekologiczne i hodowlane uwarunkowania przebudowy drzewostanów świerkowych w Beskidzie Śląskim i Beskidzie Żywieckim*. Wyd. UR w Krakowie. 67-93.
- Suchecki K. 1953. Rozwinięcie teorii ekologicznego wypełnienia przestrzeni i zastosowanie jej w hodowli lasu. *Polska Akademia Umiejętności, Kraków*.
- Suliński J. 1981. Zarys klimatu, rzeźby terenu i stosunki wodne w Puszczy Niepołomickiej. *Studia Ośrod. Dokum. Fizjogr.* 9: 25-69.
- Suliński J. 1990. Wpływ wieku drzewostanów sosnowych na głębokości średnie zwierciadła wody gruntowej. *Gospod. Wodna* 5.
- Suliński J. 1993. Modelowanie bilansu wodnego w wymianie między atmosferą, drzewostanem i gruntem przy użyciu kryteriów ekologicznych. *Zesz. Nauk. Akad. Rol. w Krakowie, Rozpr.* 179.
- Suliński J. 1997. The amount of biomass as a function of the height and density of a tree stand, *Proceedings of the III National Conference on Applications of Mathematics in Biology and Medicine*. Mądralin. October 16-19. 85-90.
- Suliński J. 2007. Metoda obliczania rocznej produkcji biomasy w zbiorowisku leśnym w zależności od wysokości i wieku drzewostanu. *Acta Agr. Silv., ser. Silv.* 45: 89-118.

- Suliński J., Jaworski A. 1998. Bilans wodny lasu w praktyce leśnej. W: Referaty i materiały pokonferencyjne międzynarodowej konferencji naukowej „Las i woda”. Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Politechnika Krakowska. 32-47.
- Suliński J., Owsiak K. 2009. Premises for the construction of balance equations of water reserves in the saturation zone of forest soil. *J. Water Land Dev.* 13b: 87-108.
- Suliński J., Starzak R. 2009. Premises for the construction of balance equations of water losses in mountain forest soils. *J. Water Land Dev.* 13a: 329-345.
- 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 Agr. Silv., ser. Silv.* 39: 3-16.
- Suliński J., Starzak R., Kucza J., Owsiak K. 2014. Zbadanie wpływu bilansu atmosfera-drzewostan-gleba na retencję wodną gleb leśnych w górach. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego MNiSzW (N N309 427338).
- Suliński J., Sypka P. 2000. Trial of identification of a solar radiation transmission formula within spruce tree stand. *Proceedings of the VI National Conference on Applications of Mathematics in Biology and Medicine.* Zawoja, September 12-15. 132-137.
- Sypka P., Starzak R. 2013. Simplified, empirical model of wind speed profile under canopy of Istebna spruce stand in mountain valley. *Agricultural and Forest Meteorology* 171-172: 220-233.
- Szymański S. 1986. *Ekologiczne podstawy hodowli lasu.* PWRiL, Warszawa.
- Wanic T., Brożek S., Lasota J., Zwydak M. 2011. Różnorodność gleb olsów i łęgów. *Roczniki Gleboznawcze* 62 (4): 109-123.
- Zasady hodowli lasu. 2012. DGLP, Warszawa.