

Metoda inwentaryzacji lasu oparta na losowaniu warstwowym wykorzystująca model wzrostu drzewostanu

Forest inventory method based on stratified sampling using a stand growth model

Arkadiusz Bruchwald^{1*}, Elżbieta Dmyterko¹, Marcin Mionskowski²

¹Institut Badawczy Leśnictwa, Zakład Zarządzania Zasobami Leśnymi, Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn, Polska; ²Biuro Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej - Zarząd, Sękocin Stary, ul. Leśników 21, 05-090 Raszyn, Polska

*e-mail: arekbruchwald@gmail.com

Abstract. The paper presents a new variant of the method for determining the stand volume of age classes in a forest district or inspectorate (subdistrict). The methodological basis for this variant of the method is a branch of mathematical statistics called the "representative method", which is based on stratified sampling, similar to the variant of forest inventory currently used in forestry. In the new variant of the method, strata are formed based on the age of the main tree species and the stand volume, which is determined by the stand growth model, while in the variant currently used, strata are formed based on the stand's main tree species and its age.

In the new variant of the stand volume determination method, 13 stages are distinguished, which can be divided into the initial and the main part. First, data from the State Forest Information System (SILP) database are processed: the age of the stand's main tree species and characteristics that allow to determine the volume of each stand of the forest district or inspectorate using a stand growth model. Based on the age and stand volume, strata for the forest district or inspectorate can be formed and the number of samples for each of these strata can be determined.

The main part of the new variant of the method starts with the measurement of DBH and tree height on the sample plots. The results of these measurements are then processed using, for example, a stand growth model. The volume of individual strata, age classes, and the entire forest district is determined. When using a growth model, many other stand characteristics are also determined, including volume increment, degree of windthrow hazard, rotation, and 10-year size of final and intermediate fellings.

The evaluation of the accuracy of the method was based on data from 73 forest inspectorates in Poland. This was preceded by studies on the dispersion measures of the sum of tree volume on sample plots of different sizes. The new variant of the forest inventory method proved to be about 30% more accurate than the previously used variant.

Keywords: stand volume, sample, damage risk, stand growth model

Słowa kluczowe: miąższość drzewostanu, próba, ryzyko uszkodzenia, model wzrostu drzewostanu

1. Wstęp

W praktyce urządzania lasu stosowana jest metoda inwentaryzacji lasu oparta na dziale statystyki matematycznej zwanym „metoda reprezentacyjna” (Zasępa 1972). Precyzuje ona zasady budowy metod określania wartości różnych cech dla danego obiektu, jak również sposób przeprowadzania oceny ich dokładności. Wyróżnikiem określonej metody jest sposób losowania próby, mający wpływ na jej dokładność i pracochłonność.

Jest kilka metod inwentaryzacji lasu różniących się sposobem losowania próby. Podstawową z nich jest metoda oparta na losowaniu nieograniczonym zwrotnym, do wyników oceny której porównuje się inne metody. Najdokładniejsza z tych metod opiera się na losowaniu warstwowym, a teza dotycząca jej większej dokładności jest spełniona wówczas, gdy cechy służące do tworzenia warstw są skorelowane z cechą główną, będącą w przypadku pomiaru lasu miąższością drzewostanów obrębu lub nadleśnictwa.

Wpłynęło: 03.07.2023 r., zrecenzowano: 02.08.2023 r., zaakceptowano: 20.09.2023 r.

Metoda losowania warstwowego wymaga w pierwszej kolejności zdobycia informacji o sile powiązania cechy głównej z cechami pomocniczymi, wykorzystywanymi do tworzenia warstw. Informacje takie można uzyskać z analizy danych przeprowadzonej na wstępnej próbie losowej składającej się np. z 50 prób. Przydatne do tego celu mogą być również informacje zdobyte wcześniej z pomiarów i analiz przeprowadzonych w innych obiektach. Najkorzystniejsza sytuacja zachodzi wówczas, gdy potrzebne informacje o obiekcie zawarte są w odpowiednich bazach danych, np. Systemie Informatycznym Lasów Państwowych (SILP) lub bazach danych Taksator.

W Polsce po raz pierwszy opracowano metodę inwentaryzacji lasu opartą na losowaniu warstwowym w 2000 r. i zastosowano ją do określenia miąższości lasów Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Pile (Bruchwald 2000a, b). Cechami służącymi do tworzenia warstw był gatunek główny drzewostanu i jego wiek, a informacje o powierzchni drzewostanów zawarte były w bazie danych tworzącego się SILP. W 2003 r. metodę losowania warstwowego wprowadzono do Instrukcji urządzania lasu, a upowszechnienie metody poprzedziły badania nad poznaniem jej dokładności (Bruchwald, Zajączkowski 2002a, b, c; Bruchwald et al. 2003).

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie nowej metody inwentaryzacji lasu opartej również, jak metoda obecnie stosowana, na losowaniu warstwowym. Do tworzenia warstw w nowej metodzie wykorzystano wiek gatunku głównego i miąższość drzewostanu określoną modelem wzrostu drzewostanu wykorzystującym dane z bazy SILP. Sprawdzone także siłę powiązań miąższości drzewostanu z innymi cechami mogącymi być ewentualnie wykorzystanymi do tworzenia warstw. Celem badań było również obliczenie miar dyspersji miąższości drzew rosnących na powierzchniach próbnych o różnej wielkości powierzchni i różnym składzie gatunkowym, co umożliwia przeprowadzenie oceny dokładności metod inwentaryzacji lasu.

2. Materiał badawczy i metodyka badań

Badania zmierzające do oceny dokładności różnych wariantów metod pomiaru lasu oparto na danych zebranych w latach 2018–2020 w 73 obrębach w ramach prac urzędzeniowych. Wybrano obręby z większości regionalnych dyrekcji Lasów Państwowych z: Białegostoku (12), Katowic (6), Krosna (2), Lublina (1), Olsztyna (5), Poznania (13), Szczecina (4), Szczecinka (9), Torunia (2), Wrocławia (9), Zielonej Góry (2), Gdańska (2), Radomia (2) i Warszawy (4). Wykorzystano również dane dotyczące tych samych obrębów zawarte w bazie SILP.

Dane z okresowej inwentaryzacji lasu zawierały dla drzewostanów, w których założono powierzchnie próbne następujące informacje: adres leśny wydzielenia, numer

powierzchni próbnej i jej wielkość (m^2), gatunek drzewa, jego wiek, pierśnicę (cm) i wysokość (m). Pomiary wysokości drzew przeprowadzono tylko na nielicznych drzewach, a dla pozostałych drzew uzupełniono je po zastosowaniu wzorów stałych krzywych wysokości.

Wygenerowane z bazy danych SILP pliki dla poszczególnych obrębów zawierały dane dotyczące wszystkich drzewostanów obrębu i obejmowały: adres leśny wydzielenia, liczbę gatunków drzew, czynnik zadrzewienia (stopień zagęszczenia dla upraw i młodników), powierzchnię drzewostanu, gatunki drzew występujące w drzewostanie, ich wiek, udział powierzchniowy (%), średnią pierśnicę (cm) i średnią wysokość (m).

Realizacja zadania jakim było poszukiwanie cech do tworzenia warstw, wymagała zastosowania metod statystyki matematycznej, zwłaszcza z działu regresji i korelacji. Określano moc powiązań między miąższością drzewostanów określoną w ramach przeprowadzonej inwentaryzacji lasu i miąższością drzewostanu określoną modelem wzrostu wykorzystującym dane z bazy SILP. Wykorzystywano również inne cechy drzewostanów zawarte w tej bazie: wiek gatunku głównego, czynnik zadrzewienia, a dla drzewostanów młodych stopień zagęszczenia, bonitację, przeciętną pierśnicę i średnią wysokość gatunku głównego. Do określania miąższości poszczególnych drzewostanów zastosowano nowe wzory empiryczne pierśnicowych liczb kształtu zawarte w algorytmie wstępnym modelu wzrostu drzewostanu.

3. Wyniki badań

Niech zmienną zależną będzie przeliczona na 1 ha miąższość drzewostanu uzyskana z inwentaryzacji lasu (V_i), a zmiennymi niezależnymi dane otrzymane z bazy SILP: gatunek główny drzewostanu, jego wiek (w), przeciętna pierśnica (Dg), średnia wysokość (Hg) i bonitacja (Bon), stopień zagęszczenia drzew (zag) i przeliczona na 1 ha miąższość obliczona modelem drzewostanu (V_m). Najlepszą cechą lub zestawem cech mogących być wykorzystanych do tworzenia warstw będą te, które są najsilniej skorelowane z miąższością uzyskaną z inwentaryzacji lasu (V_i). W tym celu obliczono średnią wartość współczynnika korelacji oceniającego moc związku między miąższością uzyskaną z inwentaryzacji 73 obrębów (V_i) i cechami zawartymi w bazie SILP przetworzonymi modelem wzrostu drzewostanu. Otrzymano następujące wyniki (r – współczynnik korelacji, R – wskaźnik korelacji):

V_i – wiek (w); $r = 0,376$,

V_i – przeciętna pierśnica (Dg); $r = 0,373$,

V_i – średnia wysokość (Hg); $r = 0,415$,

V_i – bonitacja określona na podstawie wysokości górnej (Bon); $r = 0,172$,

V_i – stopień zagęszczenia drzew (zag); $r = 0,138$,

V_i – miąższość z modelu wzrostu uzyskana na podstawie

danych z SILP (V_m); $r = 0,465$,
 V_i – wiek (w) i pierśnica (Dg); $R = 0,381$,
 V_i – wiek (w) i wysokość (Hg); $R = 0,461$,
 V_i – wiek (w) i bonitacja (Bon); $R = 0,429$,
 V_i – wiek (w) i miąższość z modelu wzrostu; $R = 0,548$,
 V_i – wiek (w), miąższość z modelu wzrostu (V_m)
 oraz iloraz tych cech ($V_{m/w}$); $R = 0,556$.

Ostatni związek okazał się najsilniejszy. Wykorzystano go w budowie nowej metody inwentaryzacji lasu.

Z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że otrzymane miary siły korelacji, a tym samym stopień zwiększenia dokładności nowej metody inwentaryzacji drzewostanów są zaniżone. Wynika to stąd, że miąższość otrzymana z inwentaryzacji, przy stosowaniu powierzchni próbnych o małych wielkościach, może być obciążona dużym błędem.

Kolejny problem wiąże się z możliwością oceny dokładności metody, co wymaga ustalenia określonej wielkości próby. Do rozwiązania tych problemów konieczne jest poznanie odchylenia standardowego i współczynnika zmienności sumy miąższości drzew na powierzchni próbnej

o odpowiedniej wielkości: 1 ar – II klasa wieku, 2 ary – III klasa, 3 ary – IV klasa, 4 ary – V klasa, 5 arów – VI klasa i starsze. Wyniki badań otrzymane po przetworzeniu danych z inwentaryzacji 73 obrębów zawarte są w Tabelach 1 i 2.

Uwzględniono w nich nie tylko przydział wielkości powierzchni próbnych do klasy wieku drzew, ale również do klas ich miąższości.

Odchylenie standardowe sumy miąższości drzew na powierzchni próbnej jest tym wyższe, im wyższa klasa wieku i im większa miąższość drzew (tab. 1). Wysoki jest zakres wahań tej miary, bowiem kształtuje się od 0,040 do 1,016. Współczynnik zmienności miąższości drzew powierzchni próbnej jest tym niższy im wyższa klasa wieku drzew, zróżnicowany jest natomiast związek tej cechy z miąższością drzewostanu (tab. 2).

W nowej metodzie wyróżniono 13 etapów.

1. Zdefiniowanie celu badań. Celem badań jest opracowanie metody określania miąższości obrębu lub nadleśnictwa z ewentualnym rozbiem na klasy lub podklasy wieku. Miąższość może dotyczyć strzały, grubizny strzały

Tabela 1. Odchylenie standardowe miąższości drzew rosnących na powierzchniach próbnych w warstwach utworzonych według wieku i miąższości

Table 1. Standard deviation of the volume of trees growing on the sample plots in strata grouped by age and volume

Klasa wieku Age class	Wielkość powierzchni próbnej Sample plot size (m ²)	Klasa miąższości Volume class (m ³ *ha ⁻¹)				
		0–100	100–200	200–300	300–400	400–...
21–40	100	0,040	0,086	0,128	0,160	0,265
41–60	200	0,126	0,172	0,220	0,267	0,377
61–80	300	0,157	0,262	0,281	0,350	0,508
81–100	400	0,111	0,325	0,337	0,402	0,633
101–...	500	0,117	0,428	0,580	0,751	1,016

Tabela 2. Współczynnik zmienności miąższości drzew rosnących na powierzchniach próbnych w warstwach utworzonych według wieku i miąższości

Table 2. Coefficient of variation of the volume of trees growing on the sample plots in strata grouped by age and volume

Klasa wieku Age class	Wielkość powierzchni próbnej Sample plot size (m ²)	Klasa miąższości Volume class (m ³ *ha ⁻¹)				
		0–100	100–200	200–300	300–400	400–...
21–40	100	58,8	59,5	55,3	52,6	58,0
41–60	200	60,9	55,4	51,7	49,8	52,3
61–80	300	44,9	51,9	48,5	48,5	49,7
81–100	400	30,3	45,5	45,8	44,4	48,8
101–...	500	16,2	38,5	40,8	43,2	47,8

lub grubizny drzewa w korze lub bez kory, z wyróżnieniem miąższości grubizny gałęzi.

2. Zdefiniowanie jednostki statystycznej, cech i populacji.

Jednostką statystyczną jest powierzchnia próbna o wielkości powiązanej z klasą wieku drzew: I klasa – 1 ar, II klasa – 2 ary, III klasa – 3 ary, IV klasa – 4 ary, starsze klasy – 5 arów.

Populacją jest łączna liczba jednostek statystycznych obrębu lub nadleśnictwa, a ściślej liczba powierzchni próbnych możliwych do założenia w obrębie lub nadleśnictwie.

Cechą główną jest miąższość powierzchni próbnej, która jest podstawą określenia miąższości klas wieku, obrębu i nadleśnictwa. Inne cechy określane na drzewach powierzchni próbnych to pierśnica, wysokość i wiek, dla powierzchni próbnych ważna jest również jej wielkość, wymagana jest znajomość innych cech zawartych w modelu wzrostu drzewostanu, w tym bonitacja drzewostanu i stopień zagęszczenia drzew.

3. Ustalenie warstw. W obecnie stosowanej metodzie inwentaryzacji lasu warstwy określa się na podstawie gatunku głównego drzewostanu i jego wieku. Często w obrębie dominuje jeden gatunek drzewa, na nizinach sosna, a w górach świerk lub buk. W takim przypadku liczba warstw jest bardzo mała, a o dokładności metody inwentaryzacji lasu decyduje moc powiązania miąższości z wiekiem gatunku głównego drzewostanu oraz liczba prób w warstwie wiekowej.

W nowej metodzie inwentaryzacji lasu przyjęto, że warstwy są tworzone na podstawie wieku gatunku głównego i przeliczonej na 1 ha miąższości drzewostanu. Obie cechy uzyskuje się z przetwarzania danych SILP modelem wzrostu drzewostanu. Planuje się utworzenie 5 warstw wg wieku i 5 wg miąższości.

4. Ustalanie wielkości próby. Autorzy proponują przyjęcie wielkości próby równej ½ liczby drzewostanów obrębu lub nadleśnictwa, których wiek gatunku głównego drzewostanu jest wyższy od 20 lat.

5. Alokacja próby do warstw. W nowej metodzie inwentaryzacji lasu proponuje się wdrożenie sposobu zaproponowanego w XX wieku przez polskiego matematyka Jerzego Splawę-Neymana: liczba jednostek w każdej warstwie jest wprost proporcjonalna do liczebności warstwy i odchylenia standardowego badanej cechy w warstwie. Taki sposób postępowania zapewnia najmniejszy błąd wnioskowania statystycznego.

Optymalny sposób alokacji próby w praktycznym zastosowaniu można przedstawić w 3 etapach: należy utworzyć warstwy na podstawie wieku gatunku głównego i przeliczonej na 1 ha miąższości drzewostanu określonej modelem wzrostu drzewostanu, dla każdej warstwy należy określić liczbę drzewostanów (n_w) i odchylenie standardowe miąższości powierzchni próbnej drzewostanu (O_w), liczbę prób w warstwie (n_p) określa się wzorem:

$$n_p = N_c \frac{n_w \cdot O_w}{\sum n_w \cdot O_w} \quad (1)$$

gdzie N_c jest liczbą prób określoną dla obrębu.

Przykład. Liczba drzewostanów obrębu Kup z pominięciem drzewostanów I klasy wieku wynosi 1746 co określa wielkość próby $N_c=873$ powierzchni. Liczbę drzewostanów w warstwach prezentuje Tabela 3, a liczbę prób w warstwie Tabela 4.

6. Przyjęcie operatu losowania. Operat losowania można traktować jako narzędzie służące do przeprowadzenia losowania. Może nim być baza danych, w której znajdują się wszystkie drzewostany obrębu lub mapa numeryczna danego

Tabela 3. Liczba drzewostanów w warstwach dla obrębu Kup z pominięciem I klasy wieku

Table 3. Number of stands in strata for the Kup forest inspectorate, excluding the first age class

Klasa wieku Age class	Klasa miąższości Volume class (m ³ *ha ⁻¹)					Razem Total
	0–100	100–200	200–300	300–400	400–...	
21–40	205	164	71	44	-	473
41–60	2	36	98	174	179	489
61–80	-	5	15	102	206	328
81–100	-	3	23	88	150	264
101–...	3	11	99	52	87	192
Razem Total	210	219	248	449	622	1746

Tabela 4. Wyniki optymalnej alokacji próby do warstw

Table 4. Results of the optimal sample allocation to strata

Klasa wieku Age class	Klasa miąższości Volume class (m ³ *ha ⁻¹)					Razem Total
	0–100	100–200	200–300	300–400	400–...	
21–40	12	20	13	7	-	52
41–60	0	9	30	66	95	200
61–80	-	2	6	50	148	206
81–100	-	1	11	50	134	196
101–...	0	7	32	55	125	219
Razem Total	12	39	92	228	552	873

obrębu. W pierwszym przypadku można opracować algorytm pozwalający na wylosowanie odpowiedniej liczby drzewostanów w warstwach. W przypadku drugim, można wylosować określoną liczbę pikseli, co pozwoli na ich lokalizację w określonym drzewostanie.

Wybór operatu losowania próby będzie zależał od dostępu do odpowiedniej bazy danych lub mapy numerycznej obrębu.

7. Losowanie próby i sposób jej terenowej alokacji.

Przedstawiono jeden z możliwych sposobów losowania próby przy założeniu, że wcześniej określono liczbę prób w warstwach utworzonych na podstawie wieku i miąższości określonej modelem wzrostu drzewostanu.

Dla poszczególnych warstw tworzy się listy wydzieleni, z których losuje się odpowiednią liczbę drzewostanów.

Kolejnym krokiem jest ustalenie miejsca, w którym będzie usytuowany w drzewostanie środek powierzchni próbnej. W tym celu nakłada się na plan drzewostanu siatkę kwadratów z ponumerowanymi przecięciami wierzchołków tej siatki. Wylosowany numer jest miejscem, w którym należy założyć powierzchnię. Terenową lokalizację tego miejsca można przeprowadzić przez odpowiednie domiary lub wykorzystując GNSS, co wymaga wcześniejszego ustalenia współrzędnych geograficznych środka powierzchni próbnej.

8. Wielkość i kształt powierzchni próbnej. Podobnie jak w dotychczas stosowanej metodzie inwentaryzacji lasu, proponuje się powiązanie wielkości powierzchni próbnej z wiekiem gatunku głównego drzewostanu, od wielkości 1 ar w II klasie wieku, 2 ary w III klasie, 3 ary w IV klasie, 4 ary w V i 5 arów w starszych klasach wieku. Powierzchnia próbna ma kształt koła, dopuszcza się również zakładanie powierzchni o kształcie kwadratu lub prostokąta.

9. Sposób pomiaru drzew na powierzchni próbnej.

Na założonej w drzewostanie powierzchni próbnej wykonuje się pomiar pierśnic wszystkich drzew. Czynność tę przeprowadza się w kierunku prostopadłym do podejścia do drzewa. W górach, gdzie przeważa podejście wzdłuż warstwicy, należy zmieniać kierunek pomiaru na prostopadły do jej przebiegu. Pomiar należy przeprowadzać zrektyfikowanym średnicomierzem, umożliwiającym dokonanie odczytu pierśnicy z zaokrągleniem do 1 mm. Wyniki pomiaru i skrót gatunku drzewa, wprowadza się do elektronicznego kalkulatora, co ułatwia i przyspiesza utworzenie bazy danych dla mierzonego obiektu.

Na powierzchni próbnej przeprowadza się również pomiar wysokości pewnej liczby drzew. W obecnie stosowanej metodzie pomiarowi podlegają 2 drzewa gatunku głównego i po jednym drzewie pozostałych gatunków. Jest to minimalna liczba drzew, którą można zaakceptować w przypadku powszechnego stosowania metody inwentaryzacji lasu w praktyce leśnictwa.

Kolejną cechą podlegającą pomiarowi jest wiek drzewostanu lub wiek grupy drzew. Informacje o tej cesze zdobywa się najczęściej z bazy danych SILP, w nielicznych przypadkach przeprowadza się jej korektę. W tym ostatnim przypadku wiek określa się na podstawie liczby okółków na drzewie lub liczby słoików na ściętym drzewie albo wywiercie, pobranym świdrem przyrostowym z nisko położonego przekroju poprzecznego pnia.

10. Pomiarowa baza danych i jej korekta. Wyniki pomiarów wprowadza się do bazy danych, gdzie zwykle uzupełnia się wysokość i wiek każdego drzewa oraz koryguje błędy.

11. Określanie miąższości powierzchni próbnej, warstwy i obrębu. Stosowanie metody statystycznej opartej na losowaniu warstwowym wymaga spełnienia warunku

o konieczności reprezentowania warstwy co najmniej przez jedną powierzchnię próbną. Nie spełnienie tego warunku wymaga łączenia warstw w ramach podklas wieku drzew, co zmniejsza dokładność metody.

Określenie miąższości warstwy wymaga w pierwszej kolejności obliczenia przeliczonej na 1 ha miąższości każdej powierzchni próbnej, a określa się ją wzorem:

$$V_p = \frac{\pi}{40000} \frac{\sum d^2 hf}{a_p} \quad (2)$$

gdzie:

V_p - przeliczona na 1 ha miąższość powierzchni próbnej (m^3),

d - pierśnica drzewa (cm),

h - wysokość drzewa (m),

f - pierśnicowa liczba kształtu,

a_p - wielkość powierzchni próbnej (ha).

W przypadku założenia w drzewostanie 2 lub więcej powierzchni próbnych, należy je połączyć w jedną większą powierzchnię.

Określenie miąższości warstwy wymaga znajomości jej powierzchni, która powinna znajdować się w bazie danych Taksator. Miąższość warstwy określa się wzorem:

$$V_w = \frac{a_w}{\sum a_d} \sum a_d V_p \quad (3)$$

gdzie:

V_w - miąższość warstwy (m^3),

V_p - przeliczona na 1 ha miąższość powierzchni próbnej (m^3),

a_w - powierzchnia warstwy (wszystkich drzewostanów zaliczonych do warstwy) (ha),

a_d - powierzchnia drzewostanu (ha).

Sumowanie dotyczy drzewostanów, w których założono powierzchnię próbną.

Określenie miąższości wymaga znajomości powierzchni wszystkich drzewostanów tego obrębu lub nadleśnictwa, a takie informacje powinny znajdować się w bazie danych SILP lub Taksator. Miąższość obrębu lub nadleśnictwa (V_o)

jest sumą miąższości warstw (tab. 5):

$$V_o = \sum V_w \quad (4)$$

Metoda inwentaryzacji lasu pozwala uzyskać informacje o wielu innych cechach, np. składzie gatunkowym, wieku grup drzew, bonitacji, czy przyroście miąższości.

12. Ocena dokładności nowej metody inwentaryzacji lasu. Ocena dokładności metody inwentaryzacji lasu dotyczy w pierwszej kolejności ustalenia błędu standardowego dla warstwy, następnie klas wieku i w końcowym etapie dla obrębu lub nadleśnictwa. W każdym przypadku należy określić jedną z miar zmienności ocenianej cechy, np. współczynnik zmienności oraz liczbę prób, na podstawie której określono analizowaną cechę. W niniejszej pracy ocenianą cechą jest miąższość.

Błąd standardowy średniej miąższości warstwy określa się wzorem:

$$P_w = \frac{W_w}{\sqrt{n_d}} \quad (5)$$

gdzie:

P_w - błąd standardowy przeliczonej na 1 ha średniej miąższości warstw (%),

W_w - współczynnik zmienności przeliczonej na 1 ha miąższości, uzyskany z powierzchni próbnych założonych w warstwie (%),

n_d - liczba powierzchni próbnych założonych w warstwie.

Takim samym wzorem określa się błąd miąższości klas wieku i miąższości obrębu lub nadleśnictwa.

Liczba prób założonych w warstwie może się wahać w szerokich granicach, np. w obrębie Kup, przy 873 powierzchniach w obrębie, od 1 do 219 i w 15 warstwach przekracza 30, co uważa się za dużą próbę (tab. 4). Warunek taki jest natomiast spełniony w każdej klasie wieku, a określony błąd standardowy waha się od 9,7% w II klasie wieku do 2,7% w klasie drzewostanów o wieku powyżej 100 lat (tab. 5). Błąd miąższości dla obrębu Kup przy 873 powierzchniach wynosi 2,3%.

Tabela 5. Miąższość grubizny i błąd jej szacowania w nowym wariantcie metody dla obrębu Kup według klas wieku

Table 5. Volume of merchantable timber and its estimation error in the new variant of the method for the Kup forest inspectorate by age classes

Klasa wieku Age class	Miąższość Volume (m^3)	Błąd Error (%)
21–40	345 032	9,7
41–60	511 705	3,8
61–80	492 892	3,4
81–100	425 592	3,1
101–...	268 031	2,7
Razem Total	2 043 247	2,3

13. Opracowanie algorytmu nowej metody inwentaryzacji lasu i jego oprogramowanie. Algorytm przetwarzający dane w nowej metodzie inwentaryzacji lasu składa się z dwóch części:

- przetwarzającej dane pozyskane z bazy SILP określając: wiek gatunku głównego i miąższość drzewostanu, utworzenie warstw, ustalenie liczby prób w warstwie,
- przetwarzającej dane z inwentaryzacji lasu: łączenie powierzchni założonych w tym samym drzewostanie, posortowanie drzew na każdej powierzchni wg gatunku i wieku, określenie miąższości i innych cech każdej powierzchni i następnie warstwy, klasy wieku i obrębu, określenie błędu dla wyróżnionych grup.

Przedstawione zadania stanowią najważniejszą część algorytmu wymagającego oprogramowania i wdrożenia do praktyki zarządzania lasu.

4. Dyskusja

W praktyce zarządzania lasu stosowana jest metoda losowania warstwowego, w której warstwy tworzone są na podstawie gatunku głównego drzewostanu i jego wieku. Cechy te są słabo skorelowane z miąższością drzewostanu, dlatego metoda ta charakteryzuje się niewiele większą dokładnością (około 10%) od metody opartej na losowaniu prostym, bezzwrotnym (Zasępa 1972).

W dotychczas stosowanej metodzie inwentaryzacji lasu wprowadzono również dodatkowe warstwy utworzone z drzewostanów zaliczonych do klasy odnowienia i klasy do odnowienia. W istocie klasy te można traktować jako subpopulacje, bowiem składają się one z kilku warstw opartych na gatunku i wieku drzew. Miąższość tych subpopulacji można określić bez zmiany zasad przyjętych pierwotnie w metodzie losowania warstwowego.

Niniejsza praca prezentuje również metodę losowania warstwowego, a warstwy tworzone są na podstawie wieku i miąższości drzewostanu określonej modelem wzrostu drzewostanu. Dane wykorzystywane przez model wzrostu drzewostanu zawarte są w bazie danych Systemu Informatycznego Lasów Państwowych (SILP).

Głównym celem obecnie stosowanej metody inwentaryzacji lasu jest określenie miąższości obrębu lub nadleśnictwa. Za cel można również uznać określenie miąższości klas wieku, należy jednak wówczas oczekiwać dużego błędu zwłaszcza w najniższej klasie wieku. Zmniejszenie tego błędu wymagałoby znacznego zwiększenia liczebności próby.

Obecnie stosowana metoda nie spełnia warunków wymaganych przy określaniu miąższości poszczególnych drzewostanów. Warunkiem podstawowym wymagającym spełnienia jest uwzględnienie wszystkich drzewostanów mierzonego obiektu, pomijając ewentualnie drzewostany I klasy wieku. W obecnie stosowanej metodzie inwentaryzacji lasu przyjmuje się najczęściej liczbę prób dla obrębu w granicach 700–1000 powierzchni, a liczba drzewostanów

II i wyższych klas wieku przekracza często 2000. Drugim warunkiem stawianym drzewostanowej metodzie pomiaru lasu jest uzyskanie dostatecznie dużej dokładności określania miąższości, a za minimalną można by było uznać błąd standardowy 5%. Warunek ten może być spełniony, gdy pomiary pierśnic drzew będą przeprowadzane na znacznie większych od obecnie stosowanych powierzchniach próbnych, a pomiary wysokości na większej liczbie drzew.

Nowa metoda inwentaryzacji lasu wykorzystująca związek między miąższością drzewostanu i wcześniej określonym wiekiem i miąższością wygenerowaną z danych bazy SILP, oparta jest na mocy związku zachodzącym między wymienionymi cechami. Sprawia on, że nowa metoda pomiaru lasów obrębu jest o około 30% dokładniejsza od metody losowania nieograniczonego bezzwrotnego. Wynik ten jest prawdopodobnie zaniżony, co wynika z niskiej jakości materiału empirycznego wziętego do oceny mocy badanego związku, w szczególności z dużego błędu miąższości poszczególnych drzewostanów, jaką uzyskuje się obecnie stosowaną metodą zarządzania lasu. Stosowanie nowej metody inwentaryzacji lasu umożliwi również określenie miąższości subpopulacji zbudowanych z drzewostanów zaliczonych do klasy odnowienia lub klasy do odnowienia.

Zastosowanie modelu wzrostu drzewostanu w praktyce zarządzania lasu byłoby ważnym etapem poszukiwań optymalnej, drzewostanowej metody określania miąższości. Otwarta byłaby wówczas droga do pełnego wykorzystania możliwości zastosowań modelu wzrostu drzewostanu, w tym do optymalnego określania rozmiaru użytkowania cięć rębnych i przedrębnych i wyznaczania kolejności drzewostanów do realizacji tych zadań.

5. Wnioski

1. Praca prezentuje metodę określania miąższości klas wieku, obrębu lub nadleśnictwa różniącą się od metody obecnie stosowanej w praktyce zarządzania lasu cechami wykorzystywanymi w tworzeniu warstw. W obecnie stosowanej metodzie warstwy tworzy się na podstawie wieku i gatunku głównego drzewostanu, w nowej metodzie na podstawie wieku i miąższości drzewostanu określonej modelem wzrostu drzewostanu.
2. Model wzrostu drzewostanu wykorzystuje dane zawarte w bazie Systemu Informatycznego Lasów Państwowych. Na podstawie pewnych cech drzewostanu model generuje rozkład pierśnic drzew, którym przyporządkowuje ich wysokości, co pozwala na określenie miąższości każdego drzewostanu obrębu lub nadleśnictwa. Miąższość ta jest wykorzystywana przy tworzeniu warstw w nowej metodzie inwentaryzacji lasu.
3. W nowej metodzie określania miąższości obrębu zaproponowano wielkość próby powiązaną z liczbą drzewostanów w obrębie lub nadleśnictwie. Większej liczbie drzewostanów odpowiada większa próba.

4. W opracowanej metodzie inwentaryzacji lasu zastosowano optymalną alokację próby, proporcjonalną do iloczynu liczby drzewostanów w warstwie i odchylenia standardowego miąższości drzew na powierzchni próbnej. Taki sposób postępowania zapewnia największą dokładność określania miąższości obrębu dla przyjętej wielkości próby.
5. Nowa metoda inwentaryzacji lasu jest o ok. 30% dokładniejsza od metody dotychczas stosowanej.
6. Nowa metoda inwentaryzacji lasu, w której zastosowanie znajduje model wzrostu drzewostanu, otwiera drogę do przyjęcia w leśnictwie drzewostanowej metody inwentaryzacji lasu. Prowadzi to do lepszego wykorzystania praw rządzących populacją drzew leśnych.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Wkład autorów

A.B. – koncepcja, analiza statystyczna; E.D. – koncepcja, przegląd literatury, pisanie pracy; M.M. – pisanie pracy.

Literatura

- Bruchwald A. 1977. Change in top height of pine forest stands with age. *Bulletin de L'Académie Polonaise des Sciences. Série des Sciences Biologiques* 5: 335–342.
- Bruchwald A. 1986. Simulation growth model MDI 1 for Scots pine. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Forestry and Wood Technology* 34: 47–52.
- Bruchwald A. 2000a. Wielkopowierzchniowa metoda określania miąższości obiektu leśnego oparta na losowaniu warstwowym. *Sylwan* 144 (3): 5–17.
- Bruchwald A. 2000b. Weryfikacja wielkopowierzchniowej metody określania miąższości obiektu leśnego opartej na losowaniu warstwowym. *Sylwan* 144 (6): 5–14.
- Bruchwald A., Miścicki S., Dmyterko E., Stereńczak K. 2017. Ocena dokładności obrębowej metody inwentaryzacji lasu opartej na losowaniu warstwowym. *Sylwan* 161 (11): 909–916. DOI 10.26202/sylwan.2017101.
- Bruchwald A., Zajączkowski S. 2002a. Obrębowa metoda inwentaryzacji lasu oparta na losowaniu warstwowym. *Sylwan* 146 (10): 13–23.
- Bruchwald A., Zajączkowski S. 2002b. Analiza porównawcza różnych sposobów inwentaryzacji lasu. *Sylwan* 146 (11): 5–13.
- Bruchwald A., Zajączkowski S. 2002c. Nowa, obrębowa metoda inwentaryzacji lasu, w: *Użytkowanie lasu w wielofunkcyjnym, zrównoważonym leśnictwie*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa: 93–101.
- Bruchwald A., Wójcik R., Zajączkowski S. 2003. Analiza dokładności obrębowej metody inwentaryzacji lasu opartej na losowaniu warstwowym. *Sylwan* 147 (5): 13–20. DOI 10.26202/sylwan.2003957.
- Zasępa R. 1972. *Metoda reprezentacyjna*. PWE, Warszawa.