

УДК: 630+528+004

ПРИКЛАДИ МЕТРИЗАЦІЇ І ПРОГНОЗУВАННЯ БІОМАСИ СОСНОВИХ ДЕРЕВОСТАНІВ У ПОЛЬЩІ

І. Козак*, **П. Стшелінський****, **А. Венгель****, **Т. Завіла-Нєдзвецький*****,
М. Засада****, **А. Степень***, **П. Коцюба***, **Г. Козак***

**Люблінський католицький університет ім. Івана Павла II,
вул. Константинув, 1Н, 20-708 Люблін, Польща*

***Познанський природничий університет,
вул. Війська Польського 71С, 60-625 Познань, Польща*

****Інститут лісових досліджень,
Варшава, вул. Браці Лєсьней 3, 05-090 Сенкоцін Старий, Польща*
*****Головна школа сільського господарства,
вул. Новоурсиновська 159, 02-776 Варшава, Польща*

Наведено приклади метризації біомаси деревостанів із домінуванням сосни (*Pinus sylvestris* L), такі як ручні вимірювання біомаси дерев у лісі; вимірювання з таксаційних ділянок, вибрані з Системи державних лісів Польщі (System Informatyczny Lasów Państwowych (SILP)); дані із фотографій (hemispheric photos); дані із наземного лазерного сканування (TLS) та надземного лазерного сканування (ALS). Зібрані й визначені дані вставлені до моделі FORKOME, у якій прогнозовано динаміку біомаси соснових деревостанів у 100-річній перспективі.

Ключові слова: біомаса, соснові деревостани, метризація, прогнозування.

У Польщі сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L) має важливе господарське значення (займає понад 70 % лісової площі). Багаторічні наукові дослідження, виконувані, передусім, ученими Головної школи сільського господарства (SGGW), дали змогу створити моделі росту дерев, опрацювати емпіричні рівняння для окремих таксаційних параметрів деревостану [1, 5, 9, 13]. Ці залежності виявлені на підставі вимірювань у лісі на пробних ділянках. Вони стосуються передусім запасу деревини, вираженого у метрах кубічних на гектар.

З екологічного погляду перспективнішими можуть бути дані щодо біомаси дерев, вираженої у тоннах на гектар, тим більше що їх можна використати до прогнозування. Дані щодо біомаси сосни в літературі часто розпорошені, стосуються лише сумарної надземної біомаси, не враховують поділу її на окремі фракції й охоплюють здебільшого молодші деревостани.

Наша мета – схарактеризувати найважливіші й найсучасніші джерела, з яких можна отримати дані щодо біомаси дерев соснових деревостанів, а також показати можливість використання їх для прогнозування змін біомаси у 100-річній перспективі.

Дослідження проведено на колових пробних ділянках Великопольського воєводства (577 пробних колових ділянок радіусом 12 м), надлісництва Дравно (965 пробних колових ділянок різного розміру – від 50 до 500 м²), на лісових ділянках надлісництва Тучно (база SILP для надлісництва Тучно містить 2 951 ділянок із деревостанами з уча-

стю 10So), а також на дослідній станції у надлісництві Тучно (північно-західна частина Польщі, 53°11'N, 16°5'E), де виконано ручні вимірювання в лісі, півсферичні фотографії, а також наземне лазерне сканування (рис. 1).

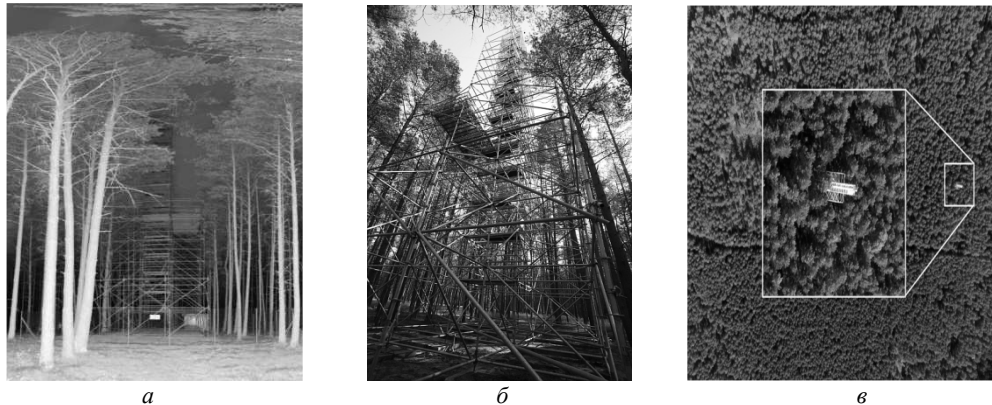


Рис. 1. Приклади об'єктів досліджень на території надлісництва Тучно:
a – конструкція вежі для вимірювання CO₂ на ділянці 195j; *б* – фрагмент аерофотознімка; *в* – образ інтенсивності пунктів ефекту лазерного сканування

Біомасу соснових деревостанів заміряли кількома способами. Перший охоплював вирубку модельних дерев, розділення їх на фракції (стовбур, гілки, хвоя/листя, шишки), зважування фракцій у лісі і подальший аналіз. Цей спосіб досить трудомісткий.

Другий спосіб – застосування алометричних рівнянь. Це досить практичний спосіб для визначення біомаси окремих органів дерев. У ньому використані параметри, які можна легко поміряти, такі як діаметр чи висота дерева. Рівняння з успіхом застосовують також для обчислення маси вуглецю, що важливо для лісових екосистем. Ми заміряли діаметр (для усіх дерев з кругових пробних площ) і висоту (для трьох дерев, найближчих до середини кругової площі) 369 дерев у радіусі 100 м від вежі. Застосовано не лише алометричні рівняння, а також перерахункові коефіцієнти BEF (Biomass Expansion Factors) до визначення фракцій біомаси, а також сумарної надземної біомаси. Використано і перерахункові коефіцієнти BEF, які визначають співвідношення між об'ємом деревостану та його біомасою (разом із підземною частиною). Ця залежність добре корелює із віком та видом дерева. Алометричні рівняння розраховані для загальної біомаси деревної частини (стовбур і гілки) та загальної маси надземної частини дерев [11].

Третій спосіб – це визначення LAI (Leaf Area Index), тобто індексу листяної поверхні – однієї з біофізичних змінних крон дерев, яка відіграє ключову роль в екофізіологічних процесах та у функціонуванні екосистем. Для визначення LAI виконано півсферичні фотографії. Використано цифровий апарат SLR – Canon EOS 5D (матриця 12 MP) з об'єктивом Sigma 8мм f/3.5 DG EX FISH EYE (рис. 2, *a*). Для аналізу півсферичних фотографій використано програму Gap Light Analyzer 2.0 (див рис. 2, *б*). На підставі аналізу півсферичних фотографій, крім індексу листяної поверхні, визначено біомасу асиміляційного апарату [2].

Четвертий спосіб – використання усереднених даних для таксаційних ділянок, вибраних із комп'ютерної системи державних лісів Польщі (System Informatyczny Lasów Państwowych (SILP)). Екологічний аналіз даних SILP, необхідних для введення у модель FORKOME, виконано для однородних соснових деревостанів. Дані SILP в ACCESS надлісництва Тучно згруповані за допомогою мови програмування SQL (Structured Query Language). Для прикладу, наведемо уривок коду, написаного цією мовою програмування:

```
SELECT          f_arodes.adress_forest,          f_storey_species.storey_cd,
f_storey_species.species_cd,          f_storey_species.part_cd,          f_storey_species.species_age,
f_storey_species.bhd,          f_storey_species.height,          f_storey_species.volume,
Round([volume]/((4*Atn(1)*([bhd]-6)^4*[bhd]^2*[height])/(40000*(0.988*([bhd]-
6)+0.2834)^4*([bhd]^4/(0.90645*[bhd]+1.2895)^4+1))),0) AS n, f_subarea.sub_area,
f_subarea.site_type_cd, f_storey_species.site_class_cda
FROM f_subarea INNER JOIN (f_storey_species INNER JOIN f_arodes ON
f_storey_species.arodes_int_num = f_arodes.arodes_int_num) ON f_subarea.arodes_int_num
= f_arodes.arodes_int_num
WHERE          (((f_storey_species.storey_cd)="DRZEW")          AND
((f_storey_species.part_cd)>"0"          And          (f_storey_species.part_cd)<>"PJD"          And
(f_storey_species.part_cd)<>"mjs"))
ORDER BY f_arodes.adress_forest;
```

Дані SILP записані також у спеціальному форматі (*. dbf), опрацьовані у програмі GIS, що дало змогу аналізувати просторове розміщення лісів.

П'ятий спосіб – надземне лазерне сканування, у якому біомасу оцінювали на підставі даних про висоту дерев [8], відсотка відбитих сигналів [10], вертикального і горизонтального поширення пунктів, отриманих зі сканера [6]. Дослідження охоплюють моделювання поверхні крони дерев (Crown Height Model (CHM)), а також аналіз кількості дерев, їхніх висот, біомаси та ін.

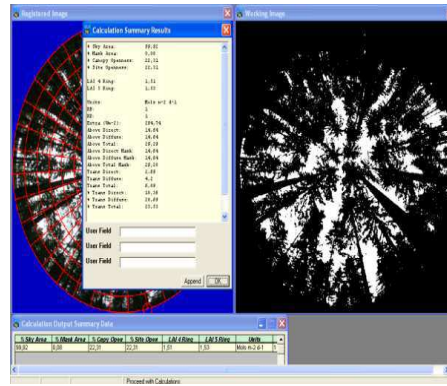
Шостий спосіб – це надземне лазерне сканування, використане для одержання точних значень вибраних параметрів дерев (кількість дерев, їхнє розміщення на площі, діаметр стовбурів, ширина крони та ін.), а також відтворення мікрорельєфу поверхні. Із цією метою використано прилад FARO Laser Scanner LS HE880 (рис. 3), за допомогою якого проведено сканування у 112 пунктах (рис. 4).

Аналіз отриманих даних засвідчив їхню важливість для прогнозування динаміки біомаси соснових деревостанів у моделі FORKOME. Детальні дані біомаси окремих частин дерев та їхня сума, як біомаса деревостану, дали змогу визначити кількість накопиченого вуглецю [4].

Результати щодо індексу листяної поверхні виявилися невисокими. У деревостанах, охоплених вимірюваннями, індекс листяної поверхні коливається в межах від 0,87 до 1,50. Причому з віком деревостану збільшується індекс часу змикання крони дерев. Після цього індекс зменшується (з огляду на внутрішньовидову конкуренцію).



a



б

Рис. 2. Приклад аналізу півсферичної фотографії, виконаної в сосновому деревостані: *a* – цифровий апарат з об’єктивом FISH EYE і штативом; *б* – приклад аналізу у програмах Gap Light Analyzer.

Якщо говорити про традиційні вимірювання (ручні вимірювання діаметра, висоти і положення дерева), то альтернативою до них є лазерне сканування. Однак програмування, куплене разом зі сканером, не завжди дає змогу швидко вибрати із багатьох пунктів потрібні для нас дані. Ручне відчитування всіх даних із багатьох пунктів є досить трудомістким порівняно з традиційними лісовими вимірюваннями. Тому ми для визначення діаметрів дерев використали алгоритми апроксимації кола (рис. 5) в арифметичному варіанті [12].



a



б

Рис. 3. Лазерне наземне сканування: *a* – сканер фірми FARO; *б* – вигляд скану площі 2 у 3D

Однак цього не завжди достатньо, особливо коли аналізуємо багато дерев на дослідній площі. У цій ситуації рекомендують збільшити точність значень добором відповідного геометричного алгоритму, у якому раніше отримане значення буде початковим пунктом [3]. Для цього опрацьовано метод автоматичного відбирання даних із файлу багатьох пунктів і вставляння до моделі FORKOME. Модель використано до детальних

вимірювань вибраних параметрів дерев (діаметра, висоти, координат X, Y кожного дерева та ін.).

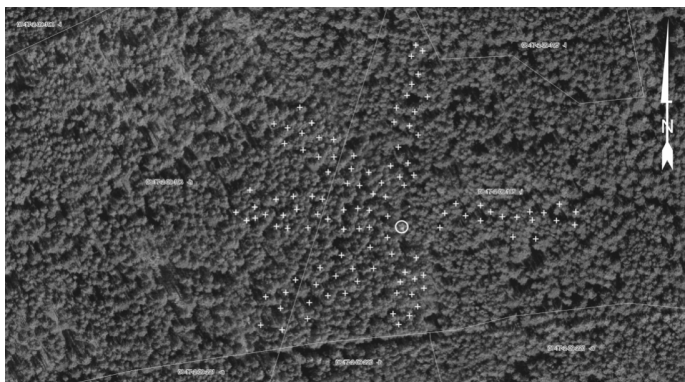


Рис. 4. Локалізація пунктів вимірювання навколо вежі, на яких виконано наземне лазерне сканування і півсферичні фотографії

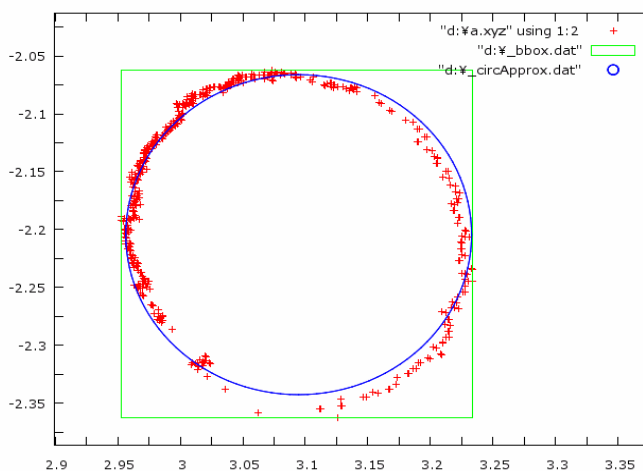


Рис. 5. Приклад аналізу даних із багатьох пунктів для діаметра дерева (поєднано кілька сканів)

Приклад результатів надземного сканування (ALS), які опрацьовані у програмі LP360, показані на фрагменті надлісництва Тучно (рис. 6).

Одержані результати підтвердили загальні тенденції, характерні для надлісництва Тучно, а саме: домінування сосни, яка займає 83,2 %, утворюючи переважно однопородні деревостани. Щоб правильно відтворити структуру діаметрів дерев, ми аналізували стандартне відхилення їхніх діаметрів. Оскільки в базі SILP не було даних щодо кількості дерев, то ми обчислювали спочатку запас середнього дерева на підставі його діаметра і висоти за допомогою емпіричної формули. Така формула для сосни

опрацьована й опублікована [1]. Ділячи запас усього деревостану (у таблицях SILP наведено запас дерев діаметром понад 5 см) на запас середнього дерева, отримуємо кількість дерев.

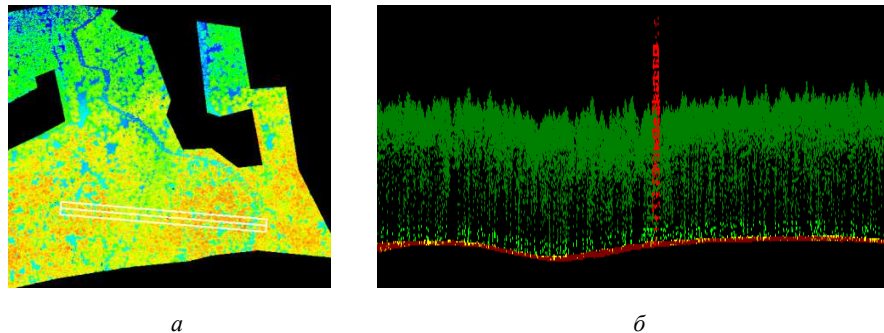


Рис. 6. Профільний вигляд досліджуваної площі:
а – вигляд згори; б – вигляд спереду

Вибрані дані із бази SILP надлісництва Тучно записано також у формі файлів dBase (*.dbf) і проаналізовано із застосуванням GIS, що дало змогу виявити залежність між екологічними параметрами, введеними у модель FORKOME, і просторовим розміщенням деревостанів залежно від динаміки їхнього росту та продуктивності.

Прогноз розвитку лісових ресурсів зроблено для кількох показових лісових комплексів із сосновими деревостанами в різних сценаріях ведення лісового господарства. Проаналізовано вплив зміни віку рубки на стан лісових запасів і продуктивність деревини. Зібрані й обчислені дані вставлено до моделі FORKOME, у якій прогнозовано динаміку біомаси соснових деревостанів у 100-річній перспективі. На підставі зібраних та проаналізованих даних опрацьовано алгоритми автоматичного введення їх у модель FORKOME та запевнення вірогідних прогнозів у моделі. Сьогодні опрацьована модель FORKOME містить також новий доданий блок GAP таксаційний. Модель FORKOME забезпечує як урахування сучасного стану і передбачення змін окремих показників навколишнього середовища, так і взаємовплив різних показників і демографічних процесів, що відбуваються в деревостанах. Блокова будова моделі FORKOME сприяє прогнозуванню змін загальної біомаси, а також біомаси стовбурів, гілок, хвої, коріння дерев у всіх лісових ділянках [7]. Використані з бази SILP дані, опрацьовані у моделі FORKOME, становлять добрий матеріал для прогнозування запасу та біомаси сосни.

Як бачимо (рис. 7), біомаса соснового деревостану, обчислена в моделі FORKOME для площі 817 003 596, становить приблизно 190 т/га. У процесі прогнозу простежуємо тенденцію до збільшення біомаси сосни протягом наступних прогнозованих 55 років. Після цього модель FORKOME прогнозує тенденцію до зменшення біомаси дерев. Це окремий прогноз (one simulation run). Він відображає характер можливих змін біомаси вибраної лісової ділянки. У моделі можливо проводити до 200 симуляцій для тих самих початкових умов. За цю функцію в моделі відповідає блок аналізу Monte Carlo. Він дає змогу подати результати у вигляді середніх значень та стандартних відхилень із цих 200 симуляцій. На підставі цих даних можемо з певністю стверджувати, що у моделі FORKOME є реальні тенденції прогнозованих змін.

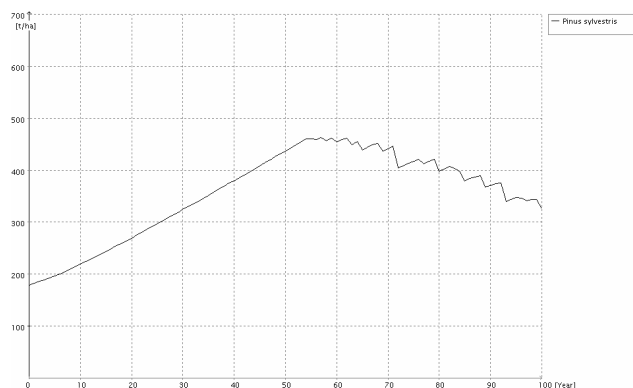


Рис. 7. Прогнозування змін біомаси дерев на площі 817 003 596

Для опрацьованої моделі FORKOME характерні інноваційність і придатність для широкого практичного застосування. Використана для прогнозування алокації й акумуляції біомаси модель висвітлює важливу проблему прогнозування і моделювання динаміки змін біомаси в соснових деревостанах.

У моделі опрацьовані алгоритми, які дають змогу автоматичним способом вставляти дані з різних баз даних, які є у польському лісівництві (SILP, лісові цифрові карти, результати вимірювань на різних площах, півсферичні фотографії, а також опрацьовані дані з наземного і надземного лазерного сканування).

Автори висловлюють подяку Міністерству науки і вищої освіти Польщі за фінансування досліджень (Проект № NN 309014638).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Bruchwald A.* Empiryczne modele kształtowania się zapasu w wybranych szeregach rozwojowych drzewostanów sosnowych / A. Bruchwald, L. Wróblewski // *Fol. For. Pol.* – 1986. – N 28. – С. 29–38.
2. *Chan S. S.* Evaluating forest cover with computerized analysis of fisheye photographs / S. S. Chan, M. C. McCreight, J. D. Walstad, T. A. Spies // *For. Sci.* – 1986. – N 32. – P. 1085–1091.
3. *Chernov N.* Circular and Linear Regression: Fitting Circles and Lines by Least Squares / N. Chernov // *Monographs on Statistics and Applied Probability.* – 2010. – Vol. 117. – 256 p.
4. *Chirrek M.* Wybrane zdalne metody szacowania biomasy roślinnej w ekosystemach leśnych jako podstawa systemu raportowania bilansu węgla / M. Chirrek, P. Strzeliński, A. Wencel, T. Zawifa-Niedźwiecki, M. Zasada, M. Jagodziński // *Roczniki Geomatyki.* – 2007. – T. 5, z. 4. – S. 7–16.
5. *Dudek A.* Changes of the basal area growth and of the volume growth in pine stands / A. Dudek // *Ann. Warsaw Agricult. Univ.: SGGW-AR, 1990. For. and Wood Technol.* – 1990. – N 40. – S. 35–45.

6. *Holmgren J.* Estimation of tree size distributions by combining vertical and horizontal distribution of laser measurements with extraction of individual trees / J. Holmgren, J. Wallerman – Vienna, 2006. – S. 168–174.
7. *Kozak I.* Przykład prognozowania zmian lasów sosnowych z zastosowaniem danych SILP / I. Kozak, A. Węgiel, P. Strzeliński, A. Stępień, H. Kozak, R. Frąk // *Наук. вісн. Волин. ун-ту.* – 2012. – N 9. – С. 14–20.
8. *Lim K.* Lidar remote sensing of forest structure / K. Lim, P. Treitz, M. Wilder, B. St-Onge, M. Flood // *Progress in Physical Geography.* – 2003. – Vol. 27. – N 1. – P. 88–106.
9. *Rymer-Dudzińska T.* Wzory empiryczne służące do określania przyrostu wysokości w drzewostanach sosnowych / T. Rymer-Dudzińska // *Sylvan.* – 2001. – N 10. – S. 41–52.
10. *Straatsma M. W.* Quantitative mapping of hydrodynamic vegetation density of floodplain forest under leaf-off conditions using airborne laser scanning / M. W. Straatsma // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* – Vol. 74, N 8. – P. 987–998.
11. *Strzeliński P.* Szacowanie zasobów węgla w lasach z wykorzystaniem technik geomatycznych / P. Strzeliński, A. M. Jagodziński, A. Wencel, T. Zawila-Niedźwiecki / *Techniki geomatyczne w inwentaryzacji lasu – potrzeby i możliwości.* – Warszawa: Wyd. SGGW, 2008. – S. 114–125.
12. *Taubin G.* Estimation of planar curves, surfaces and nonplanar space curves defined by implicit equations, with applications to edge and range image segmentation / G. Taubin // *IEEE Trans. PAMI.* – 1991. – Vol. 13. – P. 1115–1138.
13. *Zasada M.* Model wzrostu drzewostanu jako matematyczny model systemu / M. Zasada // *Sylvan.* – 1999. – N 2. – S. 59–67.

Стаття: надійшла до редакції 25.04.2013

доопрацьована 16.06.2013

прийнята до друку 12.07.2013

EXAMPLES OF METRIZATION AND PREDICTION OF PINE STANDS BIOMASS IN POLAND

I. Kozak*, P. Strzeliński, A. Węgiel**, T. Zawila-Niedźwiecki***, M. Zasada****, A. Stępień*, P. Kociuba*, H. Kozak***

**John Paul II Catholic University of Lublin,
Konstantynów Str., 1H, Lublin, 20-708, Poland*

*** Poznań University of Life Sciences,
Wojsko Polskie Str., 71C, Poznań, 60-625, Poland*

****Forest Research Institute,
Braci Leśnej Str., 3, Stary Sękocin, 05-090, Poland*

***** Warsaw University of Life Sciences,
Nowoursynowska Str., 159, Warszawa, 02-776, Poland*

In the article there are presented examples of metrication of stands biomass with a predominance of pine (*Pinus sylvestris* L), such as: hand-held measuring of trees biomass in the forest; average data for forest compartments, selected from the Computer System of State Forests; data from hemispheric photos; data from Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Aerial Laser Scanning (ALS). Collected and measured data was inserted into the FORKOME model, which predicted the biomass dynamics of pine stands for the period of 100 years.

Key words: biomass, pine stands, metrication, prediction.

**ПРИМЕРЫ МЕТРИЗАЦИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БИОМАССЫ
СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ В ПОЛЬШЕ****И. Козак*, П. Стшелинский**, А. Венгель**, Т. Завила-Недзвецкий***,
М. Засада****, А. Степень*, П. Коцюба*, Г. Козак*.**

**Люблинский католический университет им. Ивана Павла II,
ул. Константинув, 1Н, 20-708, Люблин, Польша*

***Познанский природнический университет,
ул. Войска Польского, 71С, 60-625 Познань, Польша*

****Институт лесных исследований,
Варшава, ул. Браці Лесьней 3, 05-090 Сенкоцин Старый, Польша*

*****Главная школа сельского хозяйства,
ул. Новоурсиновская 159, 02-776 Варшава, Польша*

Приведено примеры метризации биомассы древостоев с доминированием сосны (*Pinus sylvestris* L): ручные измерения биомассы деревьев в лесу; измерения для таксационных выделов, выбранные из Системы государственных лесов Польши данные с фотографий; данные из наземного лазерного сканирования и надземного лазерного сканирования. Собранные и измеренные материалы вставлены в модель FORKOME, в которой прогнозировано динамику биомассы сосновых древостоев в 100-летней перспективе.

Ключевые слова: биомасса, сосновые древостой, метризация, прогнозирование.