

УДК 581.524.3

І.І. КОЗАК¹, Т.В. ПАРПАН², П.Г. КОЦЮБА³, Г.Г. КОЗАК⁴, А. А. СТЕМПЕНЬ⁵

АНАЛІЗ ЗМІН ФІТОМАСИ ДЕРЕВОСТАНІВ У ЛІСОВИХ НАСАДЖЕННЯХ МІСТА ЛЮБЛІНА З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛІ FORKOME

Дослідження фітомаси проведено на прикладі деревостанів, які знаходяться в актуальних межах міста Любліна (Польща). На дослідних площах розмірами 25 x 25 м, закладених у дубових (2 площі), соснових (3 площі) і по одній у грабовому, модриновому та березовому деревостанах, досліджено нагромадження загальної надземної фітомаси і фітомаси за фракціями. Прогнозовано можливі зміни фітомаси до 2035 р. за допомогою моделі FORKOME. Модель FORKOME дає змогу здійснювати щорічні імітації відновлення, росту і випадання дерев, а також враховує вплив екологічних чинників на деревостани. Модель також містить постійно покращуваний презентаційний рівень, який заповнює тривимірну візуалізацію елементів у деревостанах міста.

Ключові слова: дерева, модель FORKOME, фітомаса, прогноз, Люблін

Вступ. Важливим елементом у концепції екосистемних послуг [2, 8] у містах є біотична функція [9], яка стосується таких природних процесів, як продукція та нагромадження фітомаси рослин. Найбільше нагромаджено фітомаси в межах міста у лісових деревостанах. Аналізуючи динаміку ландшафту м. Любліна у Польщі, можна знайти дослідження, пов'язані зі змінами самих меж міста та стану міських парків [3]. Однак не дослідженими залишаються біотичні функції лісових насаджень, розташованих у межах м. Любліна. Саме такі деревостани розташовані у південній частині міста і займають близько 15% його площі.

Метою дослідження є аналіз поточного стану фітомаси деревостанів як компонентів екосистем м. Любліна, а також прогнозування їх можливих майбутніх змін з використанням моделі FORKOME [5, 6].

Об'єкти та методика досліджень. Дослідження проведено в 2014-2015 рр. на восьми пробних площах (розмір кожної площі – 25 x 25 м), які було закладено у деревостанах, що розташовані у нинішніх адміністративних межах м. Любліна (деревостани підпорядковані лісництву Зембожице, надлісництва Свідник). Пробні площі відносяться до лісових масивів Домброва і Старий Гай у південній частині міста (рис. 1).

В обстежених масивах дубові деревостани за-

ймають 56-60%, а соснові – 30-32%. Площа березових, грабових і модринових є незначною (1-3%).

У більшому за площею лісовому масиві Домброва закладено пробну ділянку № 1 і 2 (рис. 2) у дубових деревостанах: перша у 53-річному насадженні (виділ 269 б), а друга – у 131-річному (виділ 282 б). Ділянку № 3 закладено у 71-річному сосновому деревостані (виділ 275 б), а № 4 – у 68-річному сосновому деревостані (виділ 281 а). Ділянку № 5 закладено у 26-річному грабовому деревостані (виділ 268 і), № 6 – у 49-річному модриновому насадженні (виділ 276 с), а одну пробну ділянку під № 7 закладено у 69-річному березовому деревостані (виділ 276 а).

У меншому за площею лісовому масиві під назвою Старий Гай закладено пробну ділянку № 8 у 86-річному сосновому деревостані (виділ 168 а).

На всіх пробах визначено видовий склад дерев, діаметр стовбурів на висоті грудей, висоту дерев та проекцію їхніх крон. Отримані дані у вигляді файлу csv вставлено до моделі FORKOME (рис. 2). Цю модель використано для аналізу нагромадження фітомаси дерев і прогнозування її динаміки до 2035 року.

Модель FORKOME належить до групи екологічних моделей і передбачає динаміку деревостанів з урахуванням окремих дерев [1, 4, 7]. У модель вмонтовано вдосконалений інтерфейс, в якому можна легко змінити параметри. Ця імітаційна модель написана у мові програмування JAVA.

¹ КОЗАК Ігор Іванович – професор, доктор біологічних наук, керівник кафедри Ландшафтної екології, Люблінський Католицький університет ім. Іоана Павла II, м. Люблін, Польща. Тел.: +48-81-4454531. E-mail: kozakihor58@gmail.com

² ПАРПАН Тарас Васильович – старший науковий співробітник, кандидат біологічних наук, Український науково-дослідний інститут гірського лісівництва ім. П.С. Пастернака, м. Івано-Франківськ, Україна. Тел.: +38-050-690-08-13. E-mail: tarasparpan@gmail.com

³ КОЦЮБА Петро Григорович – магістр, асистент кафедри Ландшафтної екології, Люблінський Католицький університет ім. Івана Павла II, м. Люблін, Польща. Тел.: +48-81-4454529. E-mail: rasopower86@gmail.com

⁴ КОЗАК Ганна Григорівна – магістр, асистент кафедри Охорони навколишнього середовища і ландшафту, Люблінський Католицький університет ім. Іоана Павла II, м. Люблін, Польща. Тел.: +48-81-4454531. E-mail: hannakozak@kul.lublin.pl

⁵ СТЕМПЕНЬ Адам Андрійович – магістр, інженер, асистент кафедри Ландшафтної екології, Люблінський Католицький університет ім. Івана Павла II, м. Люблін, Польща. Тел.: +48-81-4454529. E-mail: astepien84@gmail.com

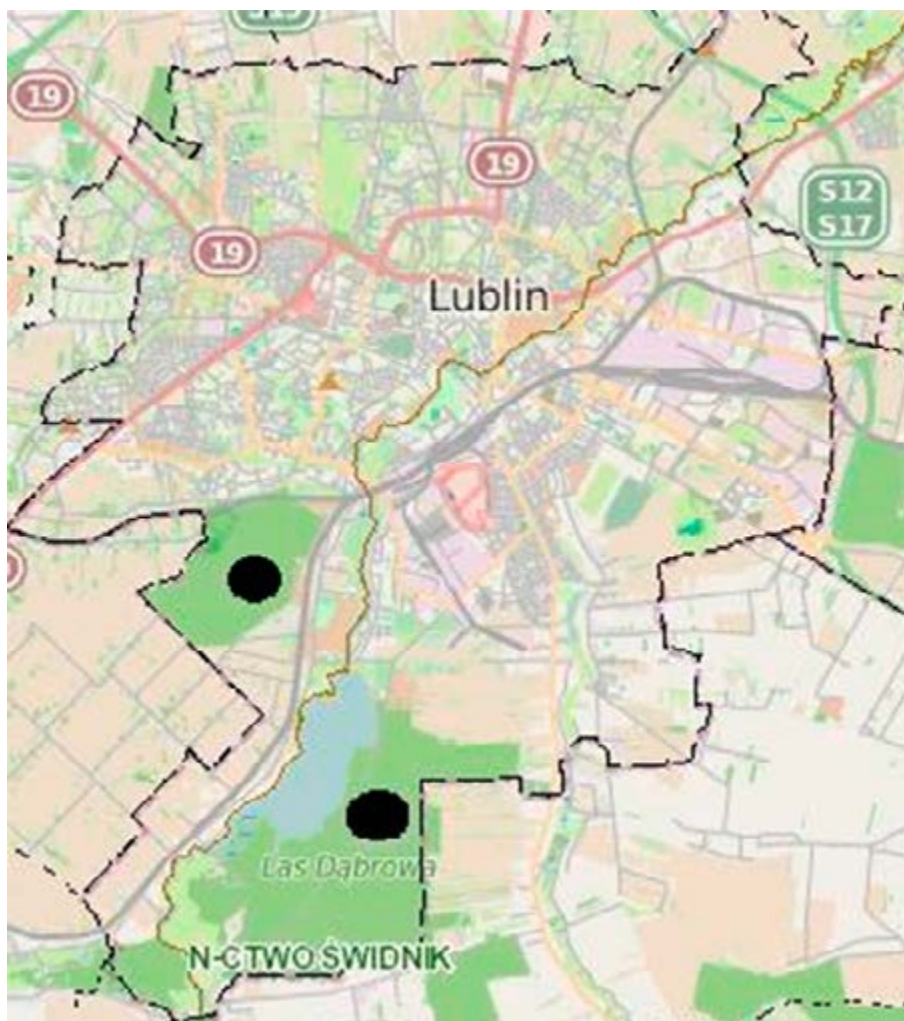


Рис. 1. Досліджувані лісові масиви у межах м. Любліна

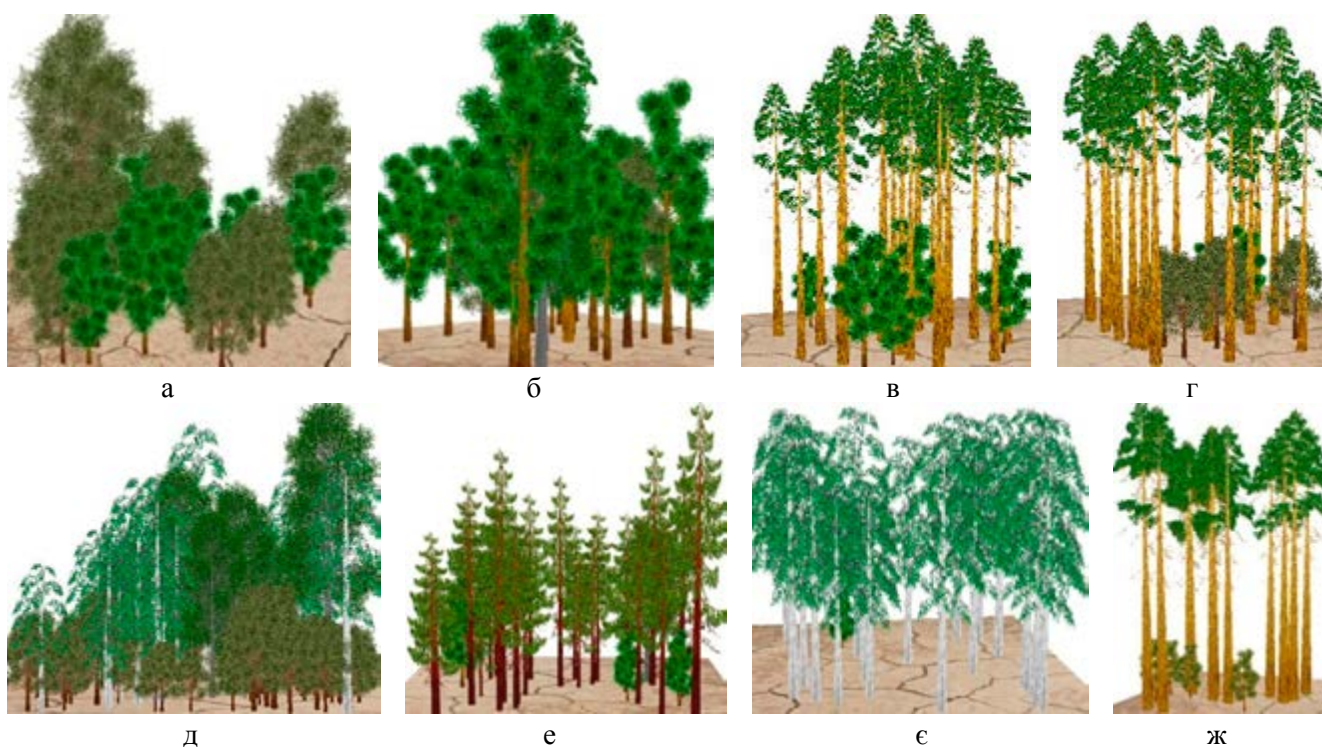


Рис. 2. Вигляд пробних площ у моделі FORKOME: а) № 1; б) № 2; в) № 3; г) № 4; д) № 5; е) № 6; є) № 7; ж) № 8

У цій роботі немає змоги описати усі блоки моделі (світло, температура, опади, ґрунт). Інформацію щодо них можна знайти у наших попередніх публікаціях [5, 6]. Для прикладу, подаємо опис тільки одного з основних блоків моделі – блоку «Ріст» (*Growth*). У цьому блоці річну імітацію росту дерева виконує функція *RunYear*, яка спочатку аналізує такі параметри закладеної пробної площі (*Area*), як ґрунт, затінення, забезпечення водою, тощо, а потім послідовно імітує ріст дерев, а також їх випадання з деревостану та зрубання. Кінцевий стан моделювання в певному році є його початковим станом у наступному.

У моделі FORKOME для кожного об'єкта «Дерево» (*Tree*) виконується власна функція росту. Вона визначає ріст дерева на основі таких критеріїв – вид, поточні параметри діаметра стовбура (*D*) і висоти (*H*). При цьому враховуються також зовнішні фактори (температура повітря, опади, світло та поживні речовини у ґрунті).

У процесі імітації (прогнозування) основним елементом програми є діаметр стовбура дерева на висоті 130 см від поверхні ґрунту. Його річний приріст розраховується за формулою

$$\delta(D^2H) = rLa \left(1 - \frac{DH}{D_{\max} H_{\max}} \right),$$

де *r* – стала для виду, що визначає продуктивність фотосинтезного апарату,

La – відносна площа листків дерева (м²/м²),

D – діаметр стовбура дерев на висоті 130 см,

H – висота дерева (см),

D_{max} – максимальний діаметр для даного виду (см),

H_{max} – максимальна висота для даного виду (см),

$\delta(D^2H)$ – приріст об'єму дерева (см³).

Максимальний приріст досягається за умов росту дерева в ідеальних умовах. У моделі FORKOME реальний приріст дерева $\delta(D^2H)$ розраховується шляхом множення оптимального $\delta(D^2H)_{opt}$ приросту і факторів, що обмежують приріст дерева (f_1, f_2, f_3, \dots), кожен із яких має значення у діапазоні 0,1. Цей підхід іменується «Мультиплікаційним підходом» (*Multiplicative approach*)

$$\delta(D^2H)_{real} = \delta(D^2H)_{opt} * f_1 * f_2 * \dots * f_p$$

де $\delta(D^2H)_{real}$ – реальне збільшення об'єму дерева, беручи до уваги вплив зовнішніх факторів,

$\delta(D^2H)_{opt}$ – приріст дерева в оптимальних умовах,

f_1, f_2, f_3, \dots – зовнішні фактори, виражені у шкалі від 0 до 1.

Результати та обговорення. Аналіз отриманих даних показав залежність фітомаси деревостанів від їхнього видового складу, віку і типу лісорослинних умов. Наприклад, найбільшою загальною фітомасою характеризуються дубові деревостани: у 53-річного дубовому деревостані вона становить 85 т/га (рис. 3, а), а 131-річному – близько 500 т/га (рис. 3, б). Прогнозування до 2035 р. показує тенденцію до зростання фітомаси (до 150 т/га на першій площі та до 570 т/га – на другій).

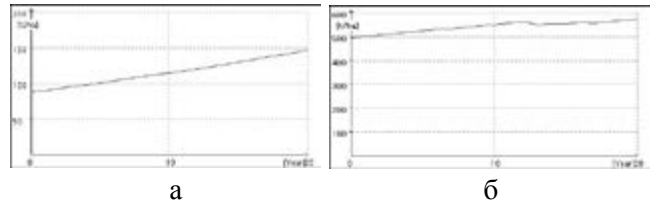


Рис. 3. Прогнозування зміни загальної фітомаси дубових деревостанів: а) площа 1; б) площа 2

Фітомаса деревостанів значною мірою залежить від типу лісорослинних умов, що підтверджується на прикладі соснових насаджень. Для старшого 71-річного сосняку (площа 3) у свіжому сугруді модель прогнозує нижчу фітомасу (рис. 4, а), ніж для молодшого 68-річного (площа 4) у свіжому груді (рис. 4, б).

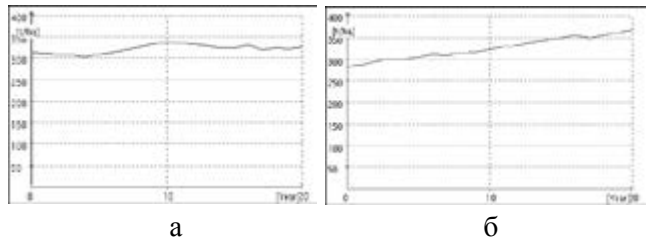


Рис. 4. Прогнозування зміни загальної фітомаси соснових деревостанів: а) площа 3; б) площа 4

Із прогнозів, виконаних у моделі FORKOME видно, що в обох типах лісу фітомаса сосни зменшиться, а фітомаса дуба – збільшиться (рис. 5, а). Цікавим є те, що у старих соснових деревостанах (віком близько 90 років) фітомаса сосни значно знизиться (рис. 5, б). Це прослідковується на прикладі 86-річного соснового деревостану (площа 8) у лісовому масиві Старий Гай.

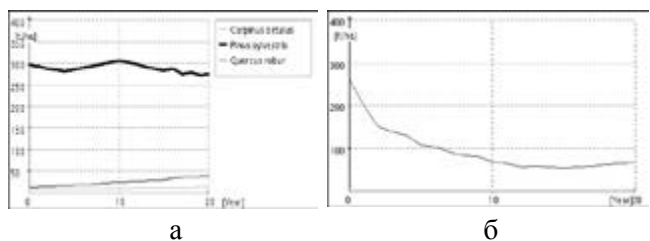


Рис. 5. Прогнозування зміни фітомаси у соснових деревостанах: а) за видами на площі 4; б) загальна фітомаса на площі 8

За здійсненим прогнозом, фітомаса 69-річного березового деревостану у 2035 р. зменшиться від 95 т/га до 10 т/га (рис. 6, а). Модель прогнозує заміну березового деревостану на дубовий із домішками граба і сосни (рис. 6, б).

Своєю чергою, грабові деревостани характеризуються найнижчою фітомасою, яка у прогнозі збільшиться від 62 т/га у 2015 р. до 130 т/га у 2035 р. (рис. 7). Прогнозування за фітомасою показало домінування дуба (рис. 7, б).

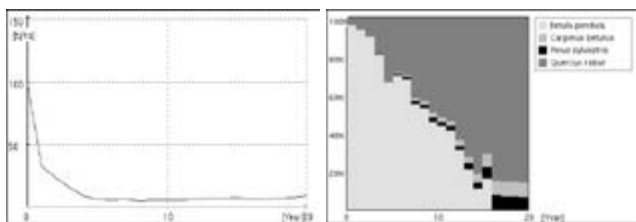


Рис. 6. Прогнозування зміни фітомаси березового деревостану:
а) загальна фітомаса; б) частка фітомаси за видами

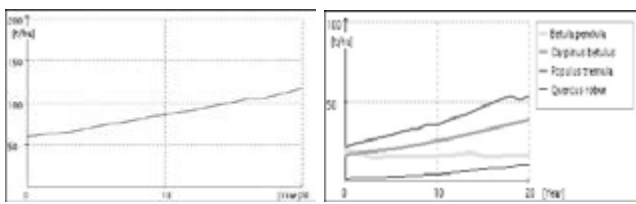


Рис. 7. Прогнозування зміни фітомаси грабового деревостану:
а) загальна фітомаса; б) фітомаса за видами

Фітомаса модринового деревостану, теперішній середній вік якого становить 50 років, за даними прогнозування може знизитись у зв'язку із випаданням старших дерев (рис. 8, а). Після цього у прогнозі помітним є збільшення фітомаси за рахунок дуба звичайного (рис. 8, б).

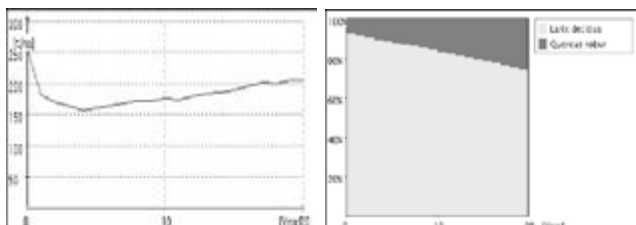


Рис. 8. Прогнозування зміни фітомаси модринового деревостану:
а) загальна фітомаса; б) частка фітомаси за видами

Для прогнозування змін фітомаси деревостанів використано модель FORKOME раніше було перевірено на закладених дубових і соснових площах у Кампіноському Національному парку під Варшавою [6], де прогнозовано можливу зміну соснових насаджень на дубові. Актуальні прогнози (проведені у південній частині Любліна) також показали можливе домінування дуба і збільшення фітомаси цього виду в досліджених деревостанах.

Отже, завдяки моделі FORKOME отримано 20-річні прогнози можливих змін фітомаси деревостанів. Модель дає змогу представити результати у вигляді таблиць і малюнків, а також отримати тривимірну візуалізацію дерев. Більше того, кожна із закладених площ займає 625 м², тобто наші площі є більшими за ті, що використовуються, наприклад,

у моделі JABOWA [1], які сягають лише 100 м². У моделі FORKOME для кожної площі виконуються прогностичні імітації з використанням статистичного аналізу із застосуванням методу Монте-Карло (30 імітацій для кожної площі). Виконання 30-ти імітацій у прогнозі після перерахунку дає загальну імітаційну площу 1,875 га (625 м² x 30 = 18750 м²).

Розрахунок фітомаси у прогностичній моделі FORKOME показав її збільшення в дубових та соснових середньовікових лісах. Натомість, фітомаса у соснових лісах старшого віку зменшиться. Отримано також прогнози змін фітомаси у деревостанах із переважанням берези, граба і модрини. З'ясовано, що у березовому насадженні після 20-ти років фітомаса зменшиться і на її місці почне формуватись дубовий деревостан з домішкою граба та сосни. Теперішня незначна фітомаса грабового деревостану впродовж прогнозу збільшиться і тут також почне домінувати дуб звичайний. Подібна ситуація складається і в модриновому деревостані, де після випадання перестиглих особин модрини збільшиться фітомаса дуба.

Вставлені до моделі FORKOME ручні заміри діаметрів, висот та проєкцій крон дерев дали змогу провести досить точний розрахунок фітомаси в тоннах на 1 га. Цей підхід виявився більш точним, порівняно з розрахунками, що ґрунтуються на середніх діаметрах і висотах дерев, на основі яких можна отримати інформацію про продуктивність лісів у м³/га з наявної у Польщі інформаційної системи державних лісів.

Варто також згадати про можливості моделі FORKOME, які не були проаналізовані у цьому дослідженні. Це, наприклад, можливість розрахунку поглинання CO₂ деревостанами у межах м. Любліна [4]. На цей час до моделі FORKOME додано блок, який дає змогу із фітомаси розрахувати кількість поглиненого CO₂.

Висновки. У моделі FORKOME існує можливість проведення щорічних імітацій відновлення, росту і випадання дерев, з урахуванням впливу екологічних факторів на деревостан. Ці чинники враховують річні суми атмосферних опадів та ефективних температур, а також вміст азоту в ґрунті і ступінь затінення. Всі досліджувані площі проаналізовано на основі визначених блоків, які враховують актуальний приріст діаметра під час імітації. Модель містить постійно поліпшуваний інтерфейс, який дає можливість тривимірної візуалізації елементів деревостанів у межах міста.

За допомогою моделі FORKOME прогнозовано можливі зміни фітомаси досліджуваних деревостанів у межах м. Любліна до 2035 року. Прогнозовано акумулювання фітомаси залежно від віку та умов росту деревостанів. Прогнози показали можливе значне нагромадження фітомаси у дубових і соснових лісостанах, тенденцію до її нагромадження в дубових деревостанах до 2035 року. Також спрогнозовано збільшення фітомаси в соснових деревостанах до цього часу в більш сприятливих типах лісорослинних умов. Березо-

ві, грабові та модринові деревостани характеризуються меншою фітомасою.

Результати, отримані в імітаціях змін у лісостанах м. Любліна за допомогою моделі FORKOME, можуть бути використані у процесі розрахунків акумулювання вуглецю в лісах досліджуваного об'єкта.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. **Botkin D.** Some Ecological Consequences of a computer Model of Forest Growth / Botkin D. B. Janak J. F., Wallis J. R. // *Journal of Ecology*. – 1972. – 60 (3): 849-872.

2. **Costanza R.** Ecosystem services: Multiple classification systems are needed / Costanza R. // *Biological Conservation* – 2008. – 141: 350-351.

3. **Kociuba D.** Rozwój terytorialny Lublina od średniowiecza do współczesności / Kociuba D. // *Annales UMCS, sec B., Vol LXII*. – 2007. – 15: 305-326.

4. **Kozak I.** Analiza wybranych modeli obliczania i prognozowania zasobów węgla w lasach: model FORBIG W ks.: Rola lasów i gospodarki leśnej w kształtowaniu bilansu węgla w ekosystemach leśnych w Polsce. / Kozak I. Brzeziecki B. // *Warszawa IBL, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych*: – 2007. – P. 145-158.

5. **Kozak I.** Symulacja dynamiki drzewostanów sosnowych Polskiej i Ukrainńskiej części Roztocza w warunkach zmian klimatu / Kozak I., Czekajka P., Kozak H., Stepień A., Kociuba P. // *Leśne Prace Badawcze*. – Vol. 74 (3). – 2013. – P. 215-226.

6. **Kozak I.** Prognozowanie zmian lasu sosnowego w obszarze ochrony ścisłej Nart w Kampinoskim Parku Narodowym z wykorzystaniem modelu FORKOME / Kozak I., Menshutkin V., Ferchmin M., Potaczala G., Józwińska M., Kozak O., Seńko Z. // *Parki Narodowe i Rezerваты Przyrody*. – 22. 4. – 2003. – P. 483-497.

7. **Shugart H. H.** A Theory of Forest Dynamics: The Ecological Implications of Forest Succession Models / Shugart H. H. // *Springer-Verlag, New York*. – 1984. – P. 921-933.

8. **Solon J.** Koncepcja „Ecosystem Services” i jej zastosowanie w badaniach ekologiczno-krajobrazowych / Solon J. // *Problemy Ekologii Krajobrazu, tom 21*. – 2008. – P. 25-44.

9. **Szumacher I.** Funkcje terenów zieleni miejskiej a świadczenia ekosystemów / Szumacher I. // *Prace i Studia Geograficzne, T. 46*. – 2011. – P. 169-176.

*И.И. Козак, Т.В. Парпан, П.Г. Коцюба,
Г.Г. Козак, А.А. Стемпень*

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ В ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ ГОРОДА ЛЮБЛИНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ FORKOME

Исследование фитомассы проведено на примере древостоев, которые находятся в пределах города Люблина (Польша). На пробных площадях разме-

рами 25 x 25 метров, заложенных в дубовых (две площади), сосновых (три площади) и по одной в грабовом, лиственничном и березовом древостоях, исследованы накопления общей надземной фитомассы и фитомассы по фракциям (стволов, ветвей, листьев и хвои).

В модели FORKOME существует возможность проведения ежегодных имитаций восстановления, роста и выпадения деревьев с учетом влияния экологических факторов на древостой. Эти факторы включают годовые суммы атмосферных осадков и эффективных температур, а также содержание азота в почве и степень затенения. Все исследуемые площади анализированы на основе выше упомянутых блоков, которые учитывают актуальный прирост диаметра ДВН при имитации. Модель FORKOME в прошлом использована в научных исследованиях в различных регионах Польши, Украины и Швеции. Модель содержит постоянно улучшаемый интерфейс, который дает возможность трехмерной визуализации элементов древостоев в границах города.

В модели FORKOME прогнозированы возможные изменения фитомассы исследуемых древостоев в границах города Люблина к 2035 году. Прогнозировано аккумулирование фитомассы в зависимости от возраста и условий произрастания древостоев. Прогнозы показали возможное значительное накопление фитомассы в дубовых и сосновых древостоях, особенно тенденцию ее накопления в дубовых древостоях. Также прогнозировано увеличение фитомассы в сосновых древостоях до 2035 года в более благоприятных условиях произрастания. Древостои бука, граба и лиственницы, как показал прогноз, могут быть заменены дубовыми древостоями.

Результаты, полученные в имитациях изменений в древостоях города Люблина при помощи модели FORKOME, могут быть использованы в процессе расчетов аккумулирования углерода в лесах города Люблина. Диаметры стволов и высоты деревьев, а также их фитомасса, в том числе и фитомасса фракций (ствола, ветвей, листьев и хвои), рассчитаны для настоящего состояния и в прогнозе до 2035 года. Результаты исследования оказались перспективными с научной и практической точки зрения.

Ключевые слова: деревья, модель FORKOME, фитомасса, прогноз, Люблин

*I. Kozak, T. Parpan, P. Kotsyuba,
G. Kozak, A. Stempen*

ANALYSIS OF STANDS BIOMASS CHANGES IN FORESTS OF LUBLIN CITY BASED ON USE OF FORKOME MODEL

The study was conducted on the sample of stands in border of current limits of the Lublin city. The biomass accumulation was analyzed on the research areas of 25 x 25 meters established in oak (2 plots), pine stands (3 plots), as well as hornbeam, larch and birch stands. There were predicted possible changes in stand biomass

with the use of the FORKOME model within 20 years (until 2035).

The FORKOME model conducts simulation of reproductive processes, growth and mortality of trees during every year, as well as the influence of additional environmental and ecological factors upon the tree stand. Among the factors considered are annual sum of precipitation, annual sum of temperatures effective DGD (degree days) for vegetation, nitrogen contents in the soil, degree of shading of the area by tree crowns. All research plots in the model are analyzed on the basis of the above-mentioned blocks, considering the actual increase of DBH during the year of simulation. It means an optimal increase of DBH, i.e. an increase of tree diameter in optimal conditions of environment. Hence, DBH is the fundamental parameter of trees on which the model FORKOME is based. This model was already used in scientific projects in various regions of Poland, Ukraine and Sweden. Model FORKOME also contains continuously developed presentation layer, which allows for 3D visualization of components of the forest stands in town.

The article shows an innovative method of analyzing changes in biomass of forest stands in Lublin using FORKOME model. The data on the current biomass accumulation in oak and pine stands were tested according to the age and conditions of stand habitats. The highest biomass accumulation estimated in oak stands, it shows a tendency of increase in their biomass by 2035. The example of pine stands predicted more substantial increase in biomass in the best habitat conditions. Birch, hornbeam and larch stands analyzed during the forecast will be replaced by oak stands. The results of the FORKOME model simulations conducted by 2035 can be used for further calculations of accumulated carbon in the forests within the territory of city of Lublin. The diameter and height of trees, and the total biomass, including fractions (trunks, branches, leaves, needles) were estimated in actual state and in prediction. The results of research are perspective not only for scientific but also for practical aspects.

Key words: trees, FORKOME model, biomass, prognosis, Lublin