

УДК 630.182:519.876.5.002.54

ІНСТРУМЕНТАРІЙ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ

Людмила Загвойська, Оксана Пелюх

*Національний лісотехнічний університет України
79057, м. Львів, вул. Ген. Чупринки, 103
E-mail: zahvoyska@ukr.net
oksana.pelyukh@gmail.com*

Моделі лісових екосистем систематизовано з використанням двох класифікаційних ознак: концепція моделювання та просторово-часова ознака. Окреслено перспективні напрями розвитку моделювання лісових екосистем.

Ключові слова: модель, моделювання, лісова екосистема, класифікація.

Актуальність дослідження. Моделювання займає чільне місце в інструментарії постнекласичної науки. Критично оцінюючи напрацьовані парадигми моделювання, їхню адекватність і ефективність в умовах високої мінливості соціальних і екологічних систем різного рівня охоплення реального світу, науковці дедалі більшу увагу надають описовим моделям, потенціал яких дозволяє генерувати нові знання, необхідні для адаптивного менеджменту досліджуваних систем [16]. Для моделювання лісових екосистем, роль яких у формуванні якісного середовища нашої життєдіяльності є фундаментальною, напрацьовано потужний інструментарій. Однак виклики сьогодення, зокрема зміна клімату, посилене антропогенне навантаження, недостатнє знання синергетичної природи лісових екосистем [8] та ін., спонукають до пошуку нових рішень для імплементації імперативу сталого розвитку.

Постановка проблеми. Суперечливий, нелінійний процес трансформації суспільних відносин у сфері лісокористування вимагає глибокого розуміння й адекватного відтворення цих процесів засобами моделювання та віртуалізації. Моделювання динаміки лісових екосистем з різним рівнем деталізації і відтворення є першим кроком, підвалиною моделювання процесів лісокористування та коеволюції соціальних та екологічних систем. Його адекватність визначає коректність подальших рішень і сценаріїв адаптивного менеджменту лісових екосистем на засадах сталості.

З іншого боку, обмежене застосування інструментів моделювання у практиці прийняття рішень щодо менеджменту лісового господарства актуалізує питання подолання розриву між наукою і практикою господарювання. Для обґрунтованого вибору парадигми та інструменту моделювання лісових екосистем необхідна систематизація напрацьованих світовою науковою спільнотою програмних рішень і ґрунтовніша поінформованість користувачів про функціональні можливості цих рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний внесок у розробку моделей процесів у лісових екосистемах зробили такі науковці як М.П. Горошко, Г.С. Домашовець, П.І. Ковальчук, І. Козак, П.І. Лакида, А.Г. Лашенко, В. Парпан,



M. Fabrica, W. Kurth, K. Merganicova, H. Pretzsch та інші, досліджуючи широкий спектр лісорослинних умов [4-7, 13, 14, 17-19].

Проблеми інтегрування моделей динаміки лісових екосистем у практику прийняття рішень на засадах сталості досліджують О. Адамовський, І. Козак, В. Парпан, J. Buongiorno, L. Cesaro, K. von Gadow, J. Gilless, L. Zadnik-Shtirn та ін. [1, 5, 10, 11].

Разом із тим питання врахування вартості послуг лісових екосистем потребують більш детальних методик і моделей для кількісної, а відтак – вартісної оцінки таких послуг як деponування вуглецю, стабілізація водного режиму, примноження біорізноманіття та ін. Зміна клімату суттєво впливає на лісові екосистеми і піднімає питання валідації моделей, параметри яких були оцінені раніше. Тому **метою** статті є систематизація сучасного програмного інструментарію моделювання лісових екосистем.

Об'єктом дослідження є функціональні можливості програмних засобів моделювання лісових екосистем.

Виклад основного матеріалу. Модель можна розглядати як математичну конструкцію, призначену для вивчення конкретної системи чи явища [15, с. 34]. Це спрощене представлення явищ і процесів реального світу, абстракція системи [14, с. 94], яка допомагає зрозуміти та вивчити досліджуване явище чи процес.

Модель будується на основі зібраної інформації, яка відома і перевірена на сьогоднішній день. Відтак, її перевіряють (верифікація, валідація, з'ясування статистичної значущості) і використовують для перевірки гіпотез, моделювання та прогнозування.

Метою моделювання лісових екосистем є формалізація процесів, які відбуваються в лісових формаціях, для відтворення і представлення динаміки лісових екосистем засобами комп'ютерної програми [14, с. 194].

Лісова екосистема є доволі складною для моделювання. Лісова екосистема – це система з виникаючою поведінкою та здатністю до самоорганізації. Ліс – це середовище, яке продукує велику кількість екосистемних послуг, як, наприклад, забезпечення сировиною і продуктами харчування, формування мікроклімату місцевості і кліматичної моделі землі, збереження біорізноманіття, регулювання водного режиму, створення привабливих ландшафтів і середовища для відпочинку, задоволення культурних і духовних потреб [12].

У процесі моделювання такої складної системи, як лісова екосистема, постає декілька питань, які необхідно вирішити [9, с. 156-157]:

- вибрати достатній рівень деталізації, щоб реалістично відтворити процеси, які відбуваються, та передбачити подальший розвиток лісу і, при цьому, володіти достатніми обчислювальними ресурсами для моделювання на високому рівні деталізації;
- вибрати адекватну тривалість кроку моделювання, оскільки ліс є повільно відновлювальним ресурсом, щоб забезпечити коректність моделювання та уникнути надмірної витрати ресурсів інформаційної системи;
- представити основні та суміжні процеси в лісових екосистемах так, щоб у процесі моделювання управлінських рішень адекватно аналізувати їхній вплив на всі компоненти системи і знайти оптимальний варіант виконання поставленого завдання;
- урахувати наявність та якість даних для кожного рівня деталізації в часі, просторі та в розрізі процесів.

Для вирішення цих питань необхідно коректно вибрати відповідний тип моделі. Тож далі розглянемо два підходи до класифікації лісових моделей.

За ознакою концепції моделювання W. Kurth (1994) запропонував класифікувати лісові моделі на емпіричні, структурні та моделі процесів (рис. 1) [17].

Емпіричні моделі, які також називають біометричні, статистичні, або моделі кореляції, зображено у верхній вершині трикутника, як моделі з найвищим рівнем агрегування. Найменшою одиницею моделювання в цих моделях є дерево або деревостан, які моделюють за допомогою статистичних рівнянь, отриманих дослідним шляхом, наприклад, з використання регресійного аналізу. За допомогою емпіричних моделей можна моделювати форму, діаметр і висоту стовбура, крону дерева, його просторове розміщення, конкуренцію з іншими деревами та ін.

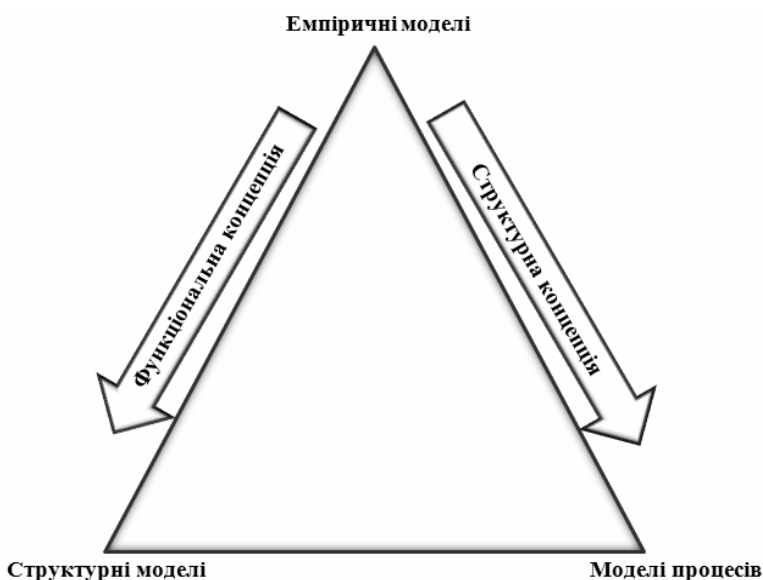


Рис. 1. Класифікація лісових моделей залежно від концепцій моделювання за W. Kurth (1994)

Залежно від рівня моделювання, емпіричні моделі можна додатково розділити на моделі окремих дерев, частотні моделі та моделі насаджень. В моделях окремих дерев змінними є діаметр, висота і параметри крони. З урахуванням того, відомі чи невідомі координати дерев, розрізняють моделі, які враховують або не враховують розміщення дерев. Розміщення дерев враховують моделі FOREST, SILVA, MOSES і SIBYLA. Не враховують розміщення дерев такі моделі як STAND PROGNOSIS MODEL, PROGNAUS, BWIN і TreeGrOSS. Частотні моделі зосереджуються на визначенні частоти повторюваності дерев в одному класі віку або в одному класі діаметру. До цього класу моделей відносять LANDSIM, LANDIS. Моделі насаджень використовують агреговані змінні (в розрахунку на 1 гектар), такі як середній діаметр, середня висота, кількість дерев і запас деревини. До цього класу моделей відносять моделі STAOET і DFIT [14].

Специфічними емпіричними моделями є їх гібридні варіанти, які відомі як напівемпіричні моделі. У цих моделях емпіричні рівняння відображають причинно-наслідкові або евристичні взаємозв'язки, які краще описують реальні біологічні



процеси. Насправді ці гібридні моделі поєднують у собі емпіричний метод моделювання з методом відображення процесів. Оскільки ці моделі звертають більшу увагу на емпіричні залежності, їх дуже часто відносять до категорії емпіричних моделей. Із вищенаведених прикладів, модель SILVA та SIBYLA [14] є напівемпіричними.

Якщо для моделювання важлива будова окремого дерева – використовують структурні моделі, якщо ж важливі функціональні зв'язки між елементами екосистеми на різних рівнях – використовують моделі процесів.

Структурні моделі, також відомі як морфологічні, зосереджуються на моделюванні будови окремих дерев, використовуючи типологію та архітектуру їх окремих частин. Метою використання цього класу моделей є отримання структури дерева: стовбура, крони, листя і плодів. Ці моделі використовують спеціальний математичний апарат фрактальної геометрії. Вони можуть бути детермінованими, стохастичними, контекстними, параметричними і т.д. До найбільш відомих інструментів структурного моделювання відносять VIRTUAL Laboratory, L-studio, CPFG, GROGRA, GroIMPL-Parser, LSysEdit, LSysMaker, Graphtal, LSYS, LSDraw, L-systems або PFG 2D [14]. Крім універсальних інструментів для моделювання (наприклад, L-systems), є також спеціалізовані, які мають риси моделей процесів. Вони називаються функціонально-структурними моделями, їх відносять до гібридних моделей. Серед таких моделей відомими є LIGNUM та EMILION.

Тоді як структурні моделі описують формування дерев у просторі на морфологічному рівні, моделі процесів намагаються проникнути в основи екофізіологічних процесів на рівні окремих частин дерева (фотосинтез, дихання, поглинання вуглецю та ін.).

На сьогодні найбільш динамічно розвиваються моделі процесів і можливо, тому в них є багато інших еквівалентних назв: екофізіологічні, біохімічні, біогеохімічні, механічні та причинно-наслідкові моделі. Вони орієнтовані на моделювання причинно-наслідкових зв'язків на рівні фізіології дерева. Емпіричні дані використовують для кращого розуміння біологічних процесів. Статистичні формули використовують зрідка і, якщо деякі з них реалізовані в моделі, то це тому, що окремі процеси ще недостатньо вивчені та описані. Зокрема, експериментальні дані використовують для вивчення причинно-наслідкових зв'язків, тому ці моделі потребують детальних вимірювань кліматичних умов, властивостей ґрунту, водного циклу (затримання опадів, випаровування, транспірація), кількості сонячної радіації, фізико-хімічних властивостей, процесу фотосинтезу та ін. З огляду на специфіку біологічних процесів, біометричні вимірювання виконують безперервно протягом усього року. Моделі цього класу описують фізіологічні процеси, такі як поглинання світла, затримання опадів, випаровування, фотосинтез, дихання, виділення, старіння та ін. До цих моделей відносять такі моделі як BALANCE і TRAGIC [14].

Усі процеси в лісових екосистемах відбуваються на різних рівнях ієрархії, починаючи від клітин, волокон, органів чи систем органів дерев, популяцій, угруповань, і закінчуючи екосистемами і біосферою загалом. Зважаючи на це Н. Pretzsch (2001) класифікував моделі лісових екосистем за ознакою часу та ієрархічного рівня моделювання (рис. 2.) [19].

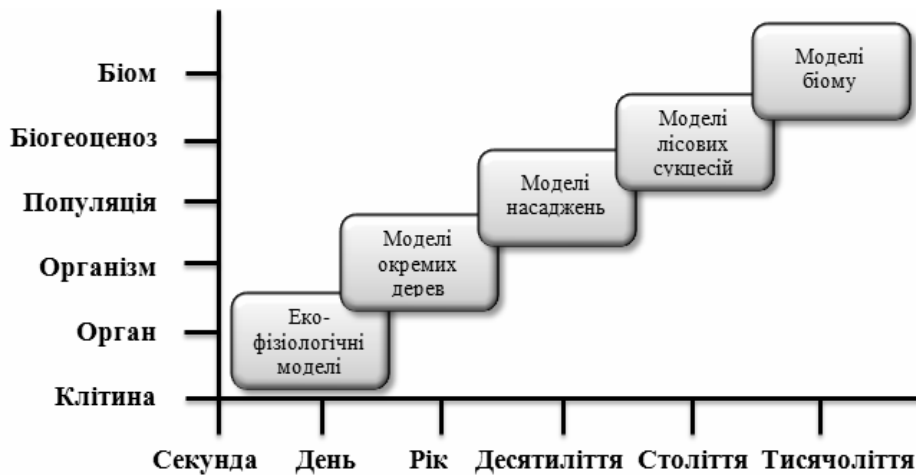


Рис. 2. Класифікація лісових моделей за ознакою часу та ієрархічного рівня моделювання за Н. Pretzsch (2001)

Еко-фізіологічні моделі – це моделі динаміки росту дерев на рівні їх частин з використанням еко-фізіологічних причинно-наслідкових зв'язків (фотосинтез, дихання, виділення). Процеси взаємодії знаходяться у центрі уваги. Статистичні залежності використовують вкрай рідко, або не використовують взагалі. Кроком моделювання є один день. Прикладом таких моделей є SPRUCE, SLOBODA та PFREUNDT, BIOMASS, Forest-BGC, SPRUCOM, TREGROW, CASA, FINNFOR, FORGRO, TEM, Tree-BGC, DEMETER, FBM, TREEDYN3, FAGUS, TRAGIC, FORDYN, 3-PG, FORSANA, HYBRID, GOTILWA, BALANCE та EFIMOD [14].

Моделі окремих дерев відтворюють мозаїку насаджень та імітують їх співіснування як просторово-часову систему. З точки зору часу найкоротший змодельований інтервал має становити один рік. Прикладами таких моделей є FOREST, STAND PROGNOSIS MODEL, STAND, SILVA, MOSES, PROGNAUS, BWIN та SIBYLA.

Моделі насаджень є найстарішими моделями лісових екосистем, вони описують їх розвиток і динаміку. Ці моделі обов'язково включають таблиці ходу росту дерев. Автентичними моделями вважаються ті, в яких біометричні принципи формалізовані у вигляді системи математичних рівнянь. Відповідним прикладом є моделі STAOET і DFIT.

Моделі лісових сукцесій – це моделі динамічного відтворення великих за площею ділянок. Ці моделі, як правило, прогнозують довгострокові характеристики зміни некерованого деревостану та вплив зміни умов росту на приріст біомаси (наприклад, з огляду на глобальну зміну клімату). З точки зору часу, для цих моделей найбільш цікавими є зміни, які відбуваються у великі проміжки часу, впродовж століть. До емпірично орієнтованих моделей лісових сукцесій належать JABOWA, FORET та PICUS, а до процесно-орієнтованих – FORSKA, ForClim та 4C.

Моделі біому, найвищий рівень ієрархії, схожі до моделей сукцесій, але їх розробляють для країн і континентів. Ці моделі можуть відображати великий період часу – тисячоліття. Найбільш відомими такими моделями є BIOME, TVM, DOLY, MAPSS, BIOME2 і BIOME3 [14].



Висновки. На сьогодні світовою практикою напрацьовано широкий спектр моделей лісових екосистем, які відображають процеси в часі та просторі, в розрізі окремих дерев, деревостанів і формацій. Ці моделі мають різне застосування і використовують різні математичні апарати. Проте потреби менеджменту лісового господарства на засадах сталого розвитку спонукають до розроблення моделей соціально-екологічної взаємодії і відображення цінності послуг лісових екосистем. Доповнюючи моделі лісових екосистем, взаємодію та коеволюцію соціальних та екологічних систем, процеси лісокористування досліджують з використанням моделей системної динаміки, багатоагентних моделей та ін.

1. Адамовський О.М. Комплексне лісокористування : методи оптимізації / О.М. Адамовський. – Львів : ЗУКЦ, 2015. – 216 с.
2. Загвойська Л.Д. Моделювання еколого-економічних систем: досягнення і проблеми / Л.Д. Загвойська // Вісник Львівського університету. Серія економічна. – Львів, 2014. – Вип. 51. – С. 130-135.
3. Загвойська Л.Д. Моделювання менеджменту лісів у контексті вимог сталого розвитку / Л.Д. Загвойська, А.В. Мельник // Вісник Львівського університету. Серія екон. – Львів, 2008. – Вип. 40. – С. 105-108.
4. Ковальчук П.І. Моделювання і прогнозування стану навколишнього середовища: навч. посібник. – К. : Либідь, 2003. – 208 с.
5. Козак І. Екологічне моделювання із застосуванням програми STELLA / Козак І., Парпан В. – Івано-Франківськ : Плай, 2009. – 189 с.
6. Лакида П.І. Біопродуктивність лісів Львівщини та її динаміка : монографія / П.І. Лакида, Г.С. Домашовець. – Корсунь-Шевченківський : ФОП І.С. Майдаченко, 2014. – 235 с.
7. Лакида П.І. Вуглецедепонувальна роль соснових насаджень, створених на староорних землях [Текст] : монографія / П.І. Лакида, А.Г. Лашенко, Я.І. Макарчук [та ін.]. – Корсунь-Шевченківський : ФОП І.С. Майдаченко, 2012. – 213 с.
8. Наближене до природи та багатофункціональне ведення лісового господарства в Карпатському регіоні України та Словаччини : посібник / За ред. Г.Т. Криницького і М.В. Чернявського. – Ужгород, ПП «Коло», 2014. – 278 с.
9. Турковська О.В. Подання лісокористування у комп'ютерних моделях еколого-економічних систем / О.В. Турковська [Електронний ресурс]. – Доступно з: <http://ena.lp.edu.ua>
10. Buongiorno J. Decision Methods for Forest Resource Management / Resource / J. Buongiorno, J. Gilles. – New York: Academic Press, 2003. – 439 p.
11. Cesaro L. Carbon fixation versus timber production in forest management, a trade-off analysis of uneven-aged forest in the Alps / Cesaro L., Virgiletti P. / Proc. of Accounting and Managerial Economics for an Environmentally-Friendly Forestry. INRA. – 1998. – N 15. – P. 227-242.
12. Common International Classification of Ecosystem services (CICES, Version 4.1). / R. Haines-Young, M. Potschin. – EEA. – 2012. – 33 p.
13. Fabrica M. Virtual forest stands as a component of sophisticated forestry educational systems / M. Fabrica // Journal of Forest Science. – 2003. – 49(9). – P. 419-428.
14. Fabrica M. Forest ecosystem analysis and modeling / Fabrica M., Pretzsch H. – Zvolen : Zvolen Technical University, 2013. – 613 p.
15. Giordano F.R. A first course in mathematical modeling. 2nd ed. / F.R. Giordano, M.D. Wier, W. Fox. – ITP, 1997. – 521 p.
16. Holling, C. S. (ed.) Adaptive Environmental Assessment and Management. – Chichester : Wiley, 1978.



17. Kurth W. Forsteinrichtung: Nachhaltige Regelung des Waldes. Deutscher Landwirtschaftsverlag / W. Kurth. – Berlin : Berlin GmbH, 1994. – 592 s.
18. Morganicova K. Testing mechanistic modeling to assess forest management impact / K. Morganicova, S.A Pietsch, H. Hasenauer // Forest Ecology and Management. – 2005. – Issue 207. – P 37-57.
19. Pretzsch H. Modellierung des Wald-wachstums / Pretzsch H. – Berlin : Parey Buchverlag, 2001. – 414 p.
20. Zahvoyska L. Deeping insights of stakeholders' perceptions regarding forest values / L. Zahvoyska / Zadnik-Shtirn L., Drobne S. (Eds.). Proceedings of the 9^h International Symposium on Operational Research. Nova Gorica, Slovenia, September 26-28, 2007. – Ljubljana : SDI, 2007. – P. 253-258.

TOOLS FOR FOREST ECOSYSTEM MODELING

L. Zahvoyska, O. Pelyukh

*Ukrainian National Forestry University,
79057 Lviv, Gen. Chuprynky str., 103*

Models of forest ecosystems are systematized using two classifications characteristics: concept of modeling and spatial-temporal features. Emerging areas of forest ecosystem modeling are outlined.

Key words: model, modeling, forest ecosystem, classification.

ИНСТРУМЕНТАРИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Л. Загвойська, О. Пелюх

*Национальный лесотехнический университет Украины
79057, г. Львов, ул. Ген. Чупринки, 103*

Модели лесных экосистем систематизированы с использованием двух классификационных признаков: концепция моделирования и пространственно-временной признак. Определены перспективные направления развития моделирования лесных экосистем.

Ключевые слова: модель, моделирование, лесная экосистема, классификация.