



Наукові праці Лісівничої академії наук України  
Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine

<http://fasu.nltu.edu.ua>  
<https://doi.org/10.15421/411829>  
Article received 2018.05.28  
Article accepted 2018.10.25

ISSN 1991-606X print  
ISSN 2616-5015 online  
@ ✉ Correspondence author  
Taras Parpan  
[tarasparpan@gmail.com](mailto:tarasparpan@gmail.com)

Mykhailo Grushevsky st., 31, Ivano-Frankivsk, 79057, Ukraine

УДК 581.524.3

## Прогнозування динаміки всихання ялиників Карпатського регіону з використанням екологічної лісової комп'ютерної моделі FORKOME

Т. В. Парпан<sup>1</sup>, І. І. Козак<sup>2</sup>, О. М. Ткачук<sup>3</sup>

*Прогноз всихання на основі останньої версії імітаційної комп'ютерної моделі FORKOME дав змогу оцінити результати моделювання щодо біокліматичних впливів на появу, виживання, ріст і загибель особин ялини та інших деревних видів. Застосована у дослідженні модель FORKOME містить елементи лісових та екологічних підходів і була спеціально розроблена для умов Українських Карпат. Моделювання здійснено на основі результатів одиначної симуляції та статистично усередненого прогнозу з 20-ти симуляцій («Monte Carlo») для показу тенденції змін та їх відповідності з одиначними симуляціями.*

*Прогноз динаміки деревостану здійснено на 20- та 50-річний періоди. У двох випадках моделювання виконано за сценаріями «контроль» та «тепло-сухо», як найбільш достовірних до реальних кліматичних змін за останні два десятиріччя. Крім того, проведено моделювання підсадки деревних видів також за сценаріями «контроль» та «тепло-сухо» на 50 років.*

*Встановлено, що динаміка деревостану на 20-річний та 50-річний періоди у контрольному варіанті та сценарії «тепло-сухо» є подібною і характеризується стрімким зниженням у першому десятилітті біомаси як наслідок випадання зі складу насадження на різних вікових стадіях ялини та у меншій кількості – перестійних особин ялиці. З'ясовано, що у контрольному сценарії з підсадкою ялиці, ялини та бука найактивніше зростання біомаси впродовж 50-річного прогнозу показали ялиця та бук. Досить чутливо на потепління та зменшення опадів відреагувала смерека, яка практично випадає на посадженій ділянці вже на початку прогнозу. Загальна біомаса насадження на контролі впродовж 50-річного прогнозу збільшується інтенсивніше порівняно із сухішими та теплішими погодними умовами, за яких вона майже у два рази менша наприкінці прогнозного періоду.*

**Ключові слова:** прогноз динаміки; біомаса; зростання; контроль; «тепло-сухо»; підсадка; реакція на потепління, чисельність видів.

**Вступ.** Важливим аспектом вивчення процесів росту та розвитку, які відбуваються в лісових екосистемах, є моделювання та прогнозування їх життєвого стану (Szumacher I., 2011). Останнім часом

прогнозування широко застосовують у всіх галузях лісового господарства для передбачення різних змін (Kozak, Czekajnska, Kozak, et. al., 2013). Екологічна лісова комп'ютерна модель FORKOME прогнозує

<sup>1</sup> Парпан Тарас Васильович – член-кореспондент Лісівничої академії наук України, кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник. Український науково-дослідний інститут гірського лісівництва ім. П.С. Пастернака, вул. Михайла Грушевського, 31, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна. Тел.: +38-050-690-08-13. E-mail: tarasparpan@gmail.com

<sup>2</sup> Козак Ігор Іванович – професор, доктор біологічних наук, керівник кафедри Ландшафтно-екології, Люблінський Католицький університет ім. Іоана Павла II, м. Люблін, Польща. Тел.: +48-814-45-45-31. E-mail: kozakihor58@gmail.com

<sup>3</sup> Ткачук Оксана Михайлівна – кандидат сільськогосподарських наук, молодший науковий співробітник лабораторії екології та захисту лісу. Український науково-дослідний інститут гірського лісівництва ім. П.С. Пастернака. м. Івано-Франківськ, 76018, Україна. Тел.: +38-096-957-20-98. E-mail: tkachuk.oksana1988@gmail.com

динаміку деревостанів з урахуванням як окремих дерев, так і цілого насадження (Botkin, Janak, & Wallis, 1972, Hong, David, Mladenoff, & Crow, 1999, Kozak, & Menshutkin, 2000). Модель FORKOME дає змогу виконувати важливі теоретичні та практичні завдання, пов'язані з веденням лісового господарства (Kozak & Parpan, 2006).

З огляду на викладене вище, *актуальним* є питання вивчення особливостей динаміки лісових угруповань за різних кліматичних та антропогенних сценаріїв за допомогою моделі FORKOME, яка дає змогу імітувати видовий склад дерев, їх кількість та біомасу, наслідки різних видів рубок, а також у нашому випадку – динаміку всихання.

**Об'єкти та методика дослідження.** *Об'єкт дослідження* – всихаючі ялинові деревостани на прикладі ДП «Вигодське лісове господарство», Івано-Франківського ОУЛМГ. *Предмет дослідження* – вивчення динаміки і структури всихаючих ялинових лісів, а саме – процесів відновлення, росту та відмирання. *Мета дослідження* – прогноз всихання ялинових деревостанів з урахуванням біотичних та абіотичних чинників.

Актуальна версія моделі FORKOME дала змогу здійснити прогноз даних від 2010 р. із пробної площі (розмір 50×60 м), яку було закладено на території Людвиківського лісництва, підпорядкованого ДП «Вигодське лісове господарство», Івано-Франківського ОУЛМГ. Інструментально встановлено географічні координати GPS: 48°47'30,5" північної широти; 23°43'53,7" східної довготи; висота над рівнем моря – 803 м. Повторні обстеження цієї пробної площі проводили в 2014 та 2016 рр. Для якомога більшої точності роботи моделі та її придатності до прогнозування проводили її верифікацію на даних 2014 та 2016 рр. через порівняння натурних і прогнозних даних. Після урухомлення моделі на старих даних створювався прогноз до стану 2014 та 2016 років. Модель відобразила майже на 90% реальні дані з 2014 та 2016 рр. і показала добру придатність до прогностичних цілей. Отже, ми досягли успішної верифікації як для стохастичної моделі. Наприклад, на 4-й рік в обраній ділянці лісу було 55 всохлих дерев ялини, а модель показала 63. Якщо поділити 55 на 63 та помножити на 100%, то подібність реальних природних лісових умов та моделі становитиме 87%.

Працюючи над прогнозуванням всихання ялинових лісів, до моделі FORKOME додали спеціальний блок «ВСИХАННЯ», за допомогою якого дерево може прийняти три основні стани: здорове, всихаюче та повалене. Здорові і всихаючі дерева мають параметр «dry», що визначає частку всихання у кроні. Здорове дерево за значення «dry» = 0% не має ознак всихання. У процесі прогнозування, коли дерево класифікується як всихаюче, змінюється його стан («is\_dry: = true»). З цього моменту дерево бере участь у процесі всихання. Цей блок відповідає за контроль над всиханням дерев і урухомлюється автоматично.

Спочатку приписували для кожного дерева у залежності від виду час («time»), устанавлюючи па-

раметри на 10 років. У процесі прогнозу щороку це значення зменшується і, відповідно, залежно від того часу, що залишився до випадання дерева, показник «dry» змінюється на значення 25, 50, 75 та 100% відповідно. Дерево у цьому стані продовжує рости, але його зростання буде зменшене на величину, яка знаходиться в параметрі «dry». Після досягнення 100% усихання дерево все ще залишається видимим у моделі (від 1 до 5, або і до 10 років). Після цього статус дерева змінюється на повалене дерево (is\_fallen). Крім того, в актуальній версії моделі FORKOME поліпшено вигляд дерев і їх текстури 3D візуалізації, на яких зображено етапи всихання і відпаду гілок з дерев. Упродовж всього процесу моделювання простежено зміни для кожного дерева від його появи, щорічного росту, до всихання і випадання зі складу насадження. Кожне дерево має свій унікальний код, що дає змогу ідентифікувати і перевірити його різні параметри (Botkin, Janak, & Wallis, 1972).

Прогноз динаміки деревостану проводили на 20- та 50-річний період. У двох випадках моделювання здійснено зі сценаріями «контроль» та «тепло-сухо», як найбільш достовірного до реальних кліматичних змін за останні десятиріччя. Крім того, проведено моделювання підсадки деревних видів за сценаріями «контроль» та «тепло-сухо» на 50-річний період.

Для початку роботи моделі визначено видовий склад дерев, діаметр стовбурів на висоті грудей, висоту, вік та проекцію крон. Отримані дані у вигляді файлу csv вставлялись до моделі і використовувались для прогнозу змін біомаси та кількості дерев у всихаючому деревостані.

**Результати та обговорення.** Загальний вигляд пробної площі на початку (рис. 1, а) та 6-му році прогнозу (рис. 1, б).

Прогноз динаміки деревостану на 20 років виконано за сценаріями «контроль» і «тепло-сухо». Біомаса за видами за сценарію «контроль», починаючи з другого року прогнозу, різко знижується (рис. 2). Особливо для ялини та ялиці цей показник зменшується у десятки разів – від 150 т/га та 110 т/га до 10 т/га, а з десятого року прогнозу і до завершення періоду онтогенезу приріст біомаси за всіма деревними видами залишається на рівні до 10 т/га.

Чисельність дерев за видами змінюється так: ялиця за 8 років прогнозу збільшує свою частку від 40 до 60%, а до кінця прогнозу – до 80%; частка клена-явора за весь період прогнозу збільшилась приблизно на 5%; береза до 10 року випадає зі складу деревостану; частка бука з другого року за 20 років збільшиться до 20% (рис. 3). Частка ялини, як основного виду, поступово знижується від 50% – на початку прогнозу до 30% – у десятому році, а до кінця прогнозу – до 10%.

На наведеному нижче графіку видно, що загальна біомаса після другого року прогнозу знижується від 310 до 110 т/га (рис. 4). Від десятого року до кінця прогнозу зміна біомаси залишається майже однаковою – 110-120 т/га.

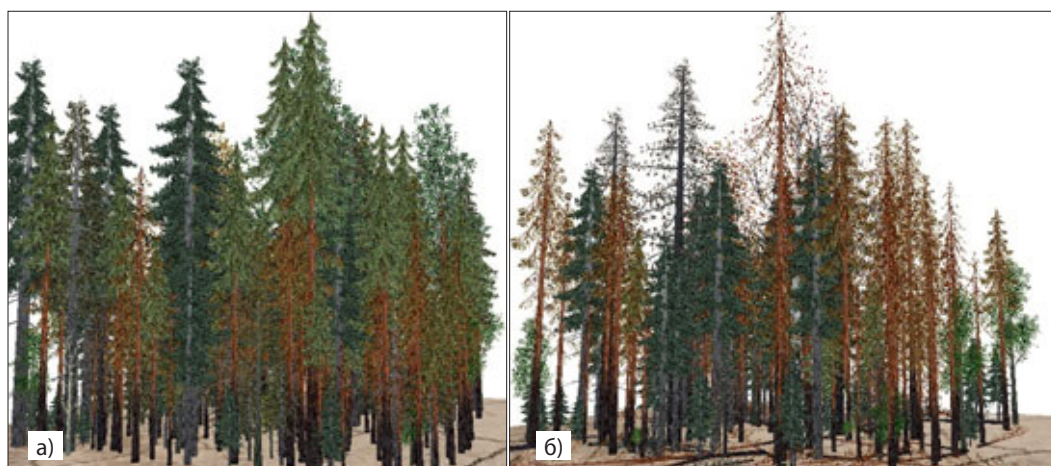


Рис. 1. Вигляд пробної площі на початку (а) та 6-му році прогнозу (б)

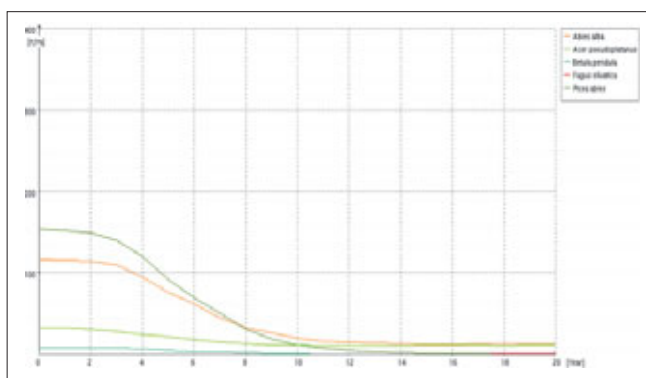


Рис. 2. Зміна біомаси за видами на контролі за 20 років

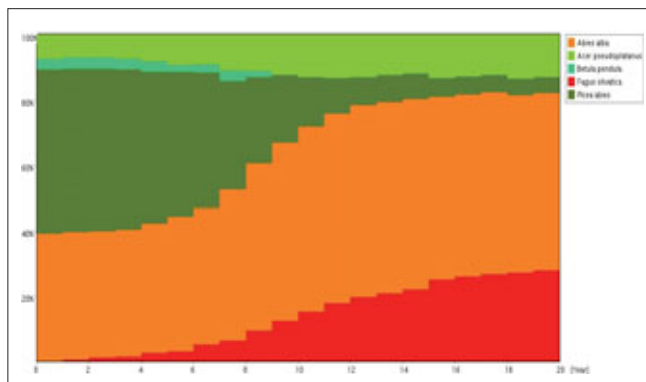


Рис. 3. Зміна частки дерев за їх кількістю і видами на контролі за 20 років

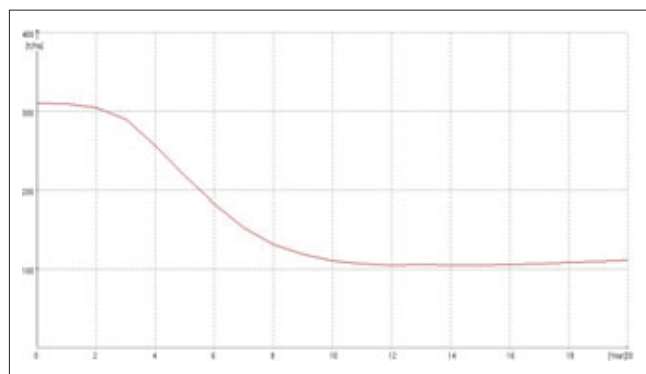


Рис. 4. Зміна загальної біомаси на контролі за 20 років

Чисельність дерев за видами (сценарій «тепло-сухо») є подібним до контрольного (рис. 5). Відмінністю є те, що зменшення ялини у складі насадження відбувається дещо повільніше. Натомість, у незначній кількості збільшується участь клена-явора.

Добре помітним є різке зниження загальної біомаси після другого року прогнозу – від 310 до 110 т/га (рис. 6). Від десятого року до кінця прогнозу зміна біомаси залишається майже однаковою – 110-120 т/га.

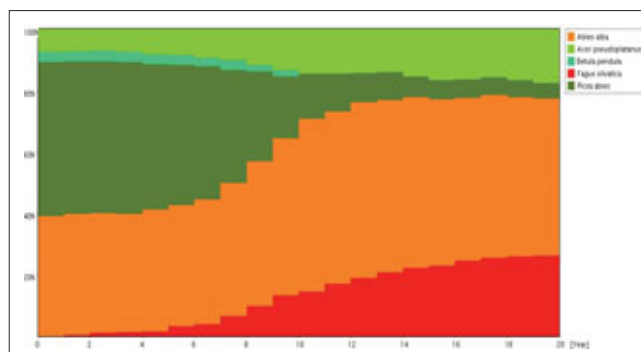


Рис. 5. Зміна частки дерев за їхньою кількістю і видами за 20 років (сценарій «тепло-сухо»)

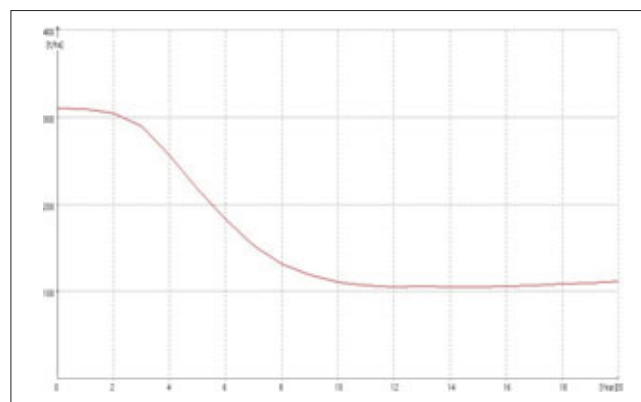


Рис. 6. Зміна загальної біомаси на контролі за 20 років

Біомаса за видами за цього сценарію, починаючи з другого року прогнозу, стрімко знижується, як і у варіанті зі сценарієм на контролі. Незначною від-

мінністю характеризується динаміка ялиці. Її біомаса є меншою, ніж на контролі (рис. 7).

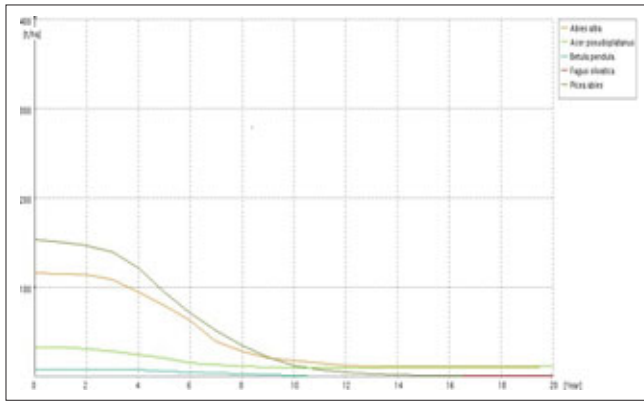


Рис. 7. Зміна біомаси за видами за 20 років (сценарій «тепло-сухо»)

Загальна біомаса подібно до контролю стрімко зменшується від 310 т/га до 40 т/га вже на 10-й рік прогнозу. Однак, на відміну від сценарію «контроль», її показник до кінця прогнозу становить менше 40 т/га (рис. 8).

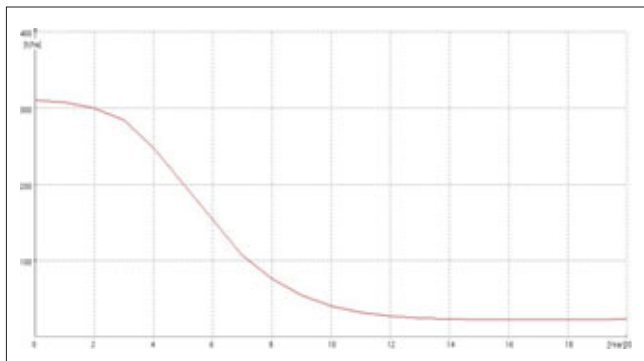


Рис. 8. Загальна зміна біомаси за 20 років (сценарій «тепло-сухо»)

Прогноз динаміки на 50 років виконано за аналогічними сценаріями («контроль» та «тепло-сухо») до попереднього (20-річного). Біомаса за видами, починаючи з другого року прогнозу, починає знижуватись (рис. 9). Особливо для ялини та ялиці цей показник зменшується на 8-10-й роки прогнозу – від 150 до 40 т/га для ялини та від 110 до 55 т/га для ялиці. До кінця прогнозу біомаса ялиці плавно зростає до 90 т/га, а ялини від 10-го до 50-го року залишається на рівні 40 т/га. Для клена-явора зміна біомаси впродовж всього періоду є незначною і коливається від 30 до 20 т/га. Біомаса берези та бука становить менше 5 т/га впродовж всього прогнозу.

Зміна чисельності дерев за видами така: ялиця за 10 років збільшує свою участь від 40 до 60%, а наприкінці прогнозу цей показник наближається до 75%; частка клена-явора за весь період прогнозу зменшилась приблизно на 3%; береза до 10 року випадає зі складу деревостану. Чисельність бука з другого року повільно, але постійно збільшується (до 20%) наприкінці прогнозу (рис. 10). Чисельність ялини поступово знижується: на початку про-

гнозу вона становить 50%, у десятому році – менше 30, а у 50-му році прогнозу – менше 20%.

Загальна біомаса після другого року прогнозу різко знижується – від 310 до 100 т/га, а від 12-го року до кінця прогнозу спостерігається її поступове збільшення – до 150 т/га (рис. 11).

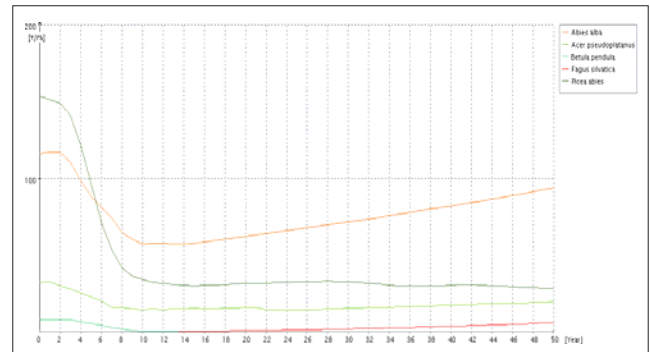


Рис. 9. Біомаса за видами у т/га на контролі за 50 років

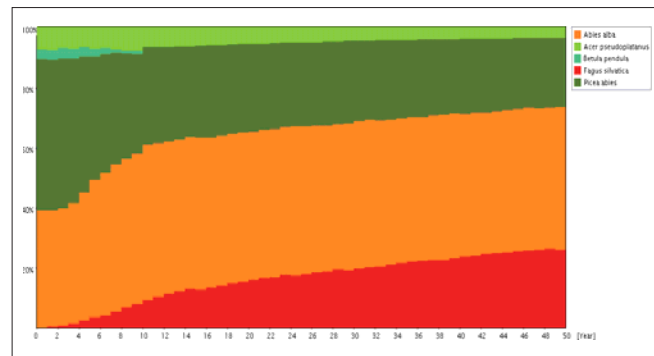


Рис. 10. Зміна частки дерев за їх кількістю і видами на контролі за 50 років

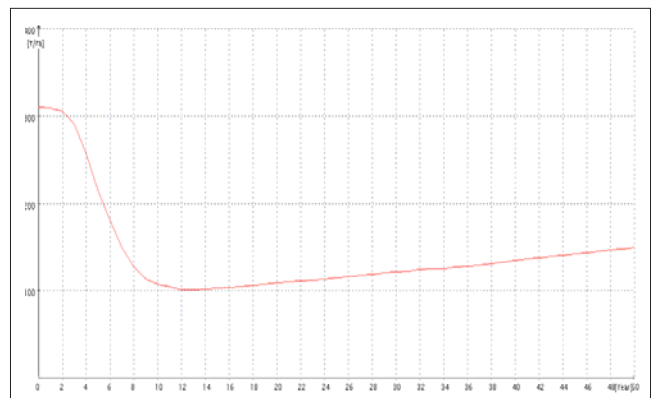


Рис. 11. Зміна загальної біомаси на контролі за 50 років

За рис. 12 (сценарій «тепло-сухо») біомаса за видами, починаючи так само як на контрольному сценарії, знижується в перші 10 років прогнозу. Помітною відмінністю є те, що біомаса усіх деревних видів після 10-го року залишається незначною – на рівні 10-20 т/га.

Чисельність дерев (сценарій «тепло-сухо») за видами змінюється так: ялиця за 10 років прогнозу збільшує свою участь від 40 до 80%, а до кінця прогнозу – 85% (рис. 13). Кількість клена-явора за

весь період прогнозу коливалась на рівні 8-15%, а на кінець прогнозу становить 10%. Береза до 10 року випадає зі складу деревостану, а чисельність бука після другого року прогнозу повільно, але постійно збільшується до 35% на 50-й рік прогнозу. Кількість ялини стрімко зменшується до 10 року – від 50% на початку до 10% на 12-й рік прогнозу. Після цього її частка у складі деревостану становить менше 8%.

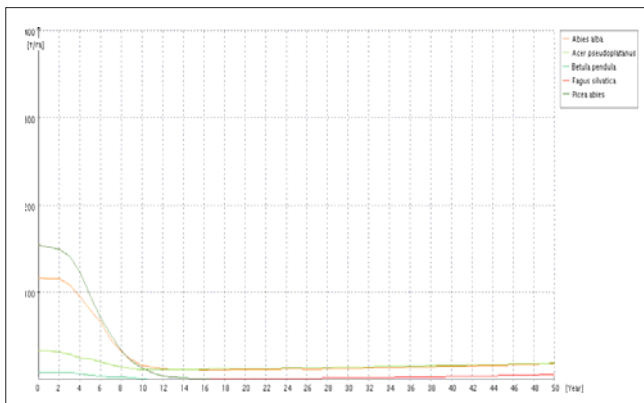


Рис. 12. Зміна біомаси за видами за 50 років (сценарій «тепло-сухо»)

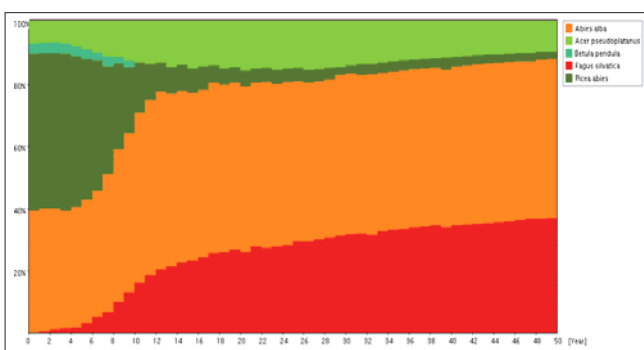


Рис. 13. Зміна частки дерев за їх кількістю і видами за 50 років (сценарій «тепло-сухо»)

Загальна біомаса за сценарію «тепло-сухо» подібно до контрольного різко зменшується (рис. 14). До 10-го року вона спадає до 25 т/га, після чого характерним є її незначне зростання і наприкінці прогнозу становить 40 т/га.

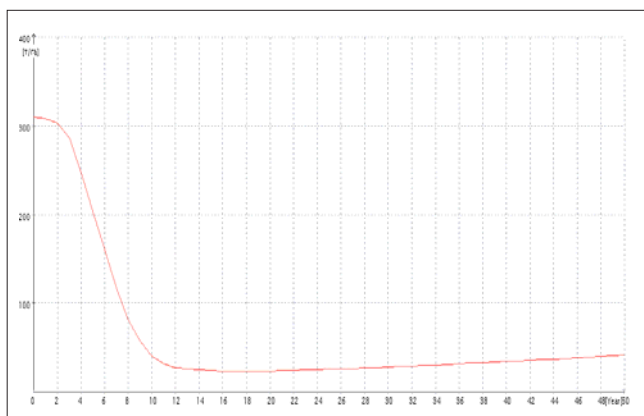


Рис. 14. Зміна загальної біомаси (сценарій «тепло-сухо»)

Прогноз динаміки деревостану на 50 років виконано з підсадкою дерев за сценаріями «контроль» та «тепло-сухо». Наступним завданням з відновлення корінного деревостану на місці всихаючого ялинового деревостану була підсадка ялиці, ялини та бука. Садіння виконували за схемою 2 м між рядами та 1 м між саджанцями. В один ряд висаджували ялицю, у другий – ялину, а у третій, з аналогічною послідовністю до попередніх, бук. Усього висаджено 325 дерев на площі 25×25 м. Візуалізація, маючи певні обмеження у програмі, відтворює зображення саджанців та є дещо відмінною від реальної, але це не впливає на дію програми та результати прогнозу на 50 років (рис. 15, 16).

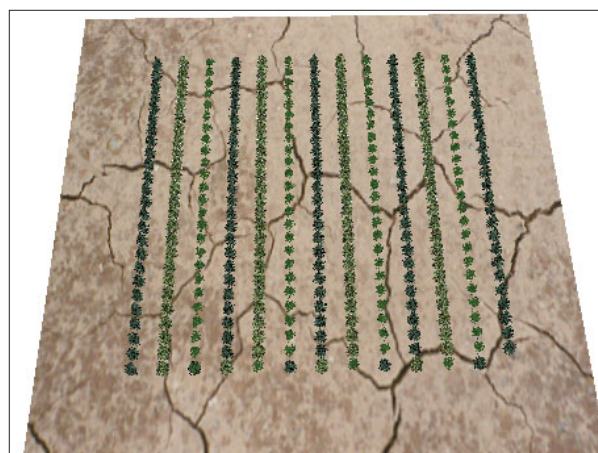


Рис. 15. Схема посадки ялини, ялиці та бука

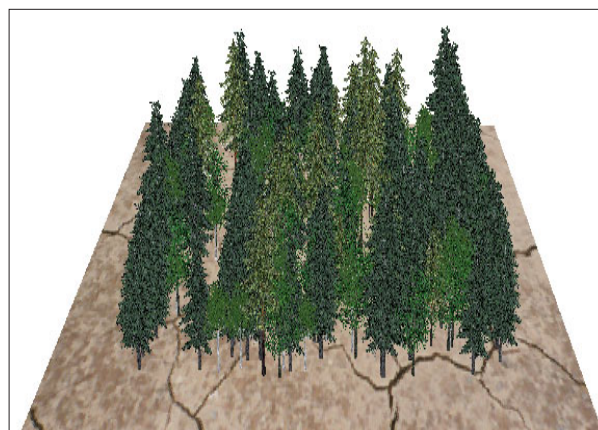


Рис. 16. Загальний вигляд площі через 50 років прогнозу на контролі

Біомаса за видами після 20-го року прогнозу поступово збільшується (рис. 17). Найактивніший ріст характерний для ялиці та бука. Наприкінці прогнозу їх біомаса становить 45 та 40 т/га відповідно. У три рази меншою є біомаса клена-явора (20т/га) та ялини (16 т/га).

Чисельність дерев за видами змінюється так: добре помітним є збільшення кількості ялиці вже на 10-й рік прогнозу – від 33 до 75% (рис. 18). Надалі її чисельність дещо зменшується на користь інших видів і становить у 50-му році 65%; чисельність особин бука у 10-му році зменшується до

10% порівняно з 33% на початку прогнозу. Надалі до кінця прогнозу вона збільшується до 18%; чисельність ялини на 8-й рік прогнозу становить 15%, а в подальшому її участь до кінця прогнозування знижується до 10%; на 5-му році прогнозу у складі насадження природно з'являється клен-явір. Його участь впродовж усього подальшого періоду прогнозування становить близько 12%.

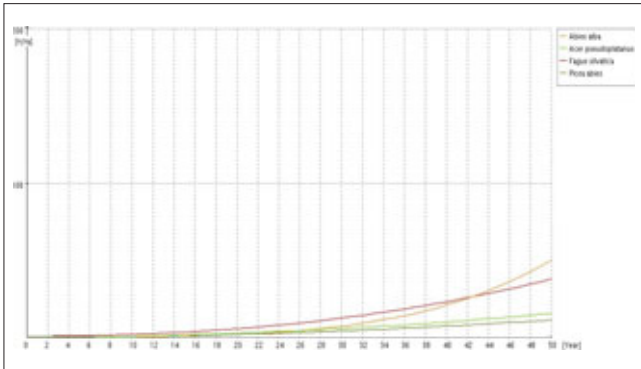


Рис. 17. Зміна біомаси за видами на контролі за 50 років

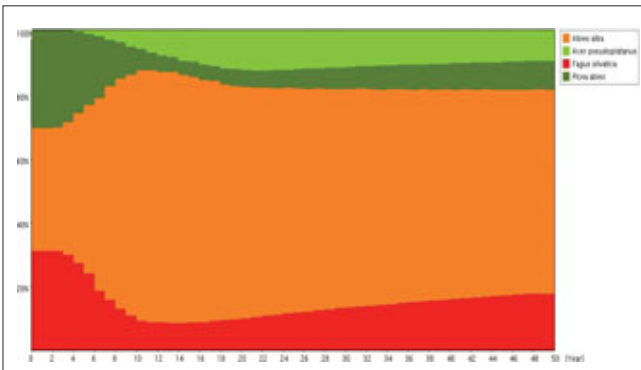


Рис. 18. Зміна частки дерев за їх кількістю і видами на контролі за 50 років

Загальна біомаса на контролі насадження плавно зростає і збільшується після 25-го року до кінця прогнозу більш ніж у чотири рази – від 25 до 110 т/га (рис. 19).

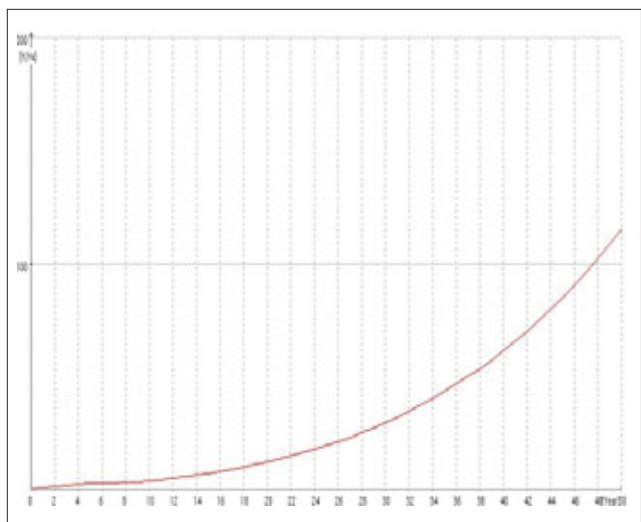


Рис. 19. Зміна загальної біомаси на контролі за 50 років

За здійсненим прогнозом, біомаса за видами після першого десятиріччя поступово збільшується (рис. 20). Найбільше її зростання характерне для бука – 40 т/га. За ним слідує клен-явір (20 т/га) та ялиця (15 т/га). У цьому сценарії біомаса ялини є дуже низькою і становить менше однієї т/га до 10-го року прогнозу.

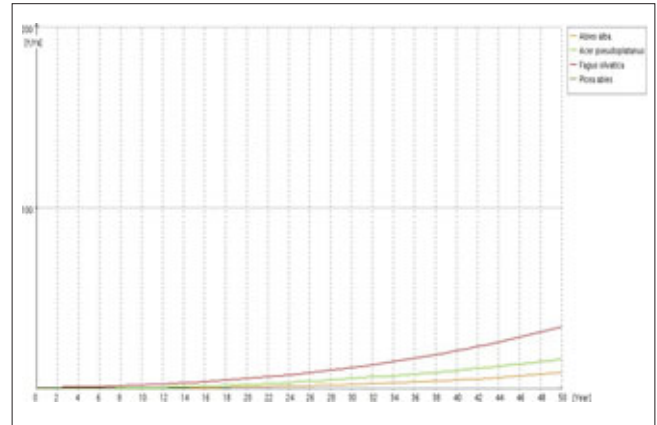


Рис. 20. Зміна біомаси за видами з підсадкою за 50 років (сценарій «тепло-сухо»)

Чисельність дерев за видами змінюється так: ялиця за весь період прогнозу коливається в межах 30-35%; чисельність особин бука незначно збільшилась і на кінець періоду становить 38%, а кількість ялини з 6-го року прогнозу стрімко знижується і до 25-го року займатиме 5% у складі насадження (рис. 21). Надалі до кінця прогнозу її частка зменшується до 3%. Як і у варіанті з контролем, на 5-му році прогнозу з'являється клен-явір, але на відміну від попереднього рисунку, його участь є значно більшою і становитиме 28% наприкінці прогнозу.

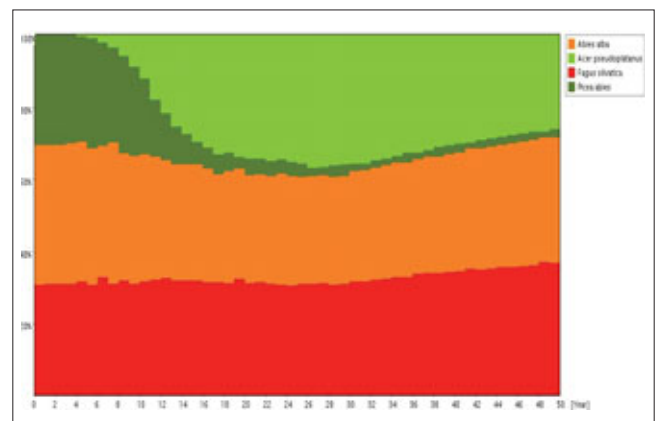


Рис. 21. Зміна частки видів з підсадкою за 50 років (сценарій «підсадка/«тепло-сухо»)

**Висновки.** Моделювання сценаріїв на 20- та 50-річний періоди показало різкий спад біомаси деревостану у першому десятиріччі. Особливо чутливо на зміну кліматичних умов реагує ялина. Її частка та біомаса в двох сценаріях зменшується на користь ялиці, бука та клена-явора, які характеризуються значно кращою адаптацією до тепліших та сухіших умов на наступні десятиліття. Підсадка

трьох ключових видів за двох кліматичних варіантів на 50-річний період показала збільшення біомаси ялиці та бука. Особливо активним приростом за теплішого та сухішого сценарію характеризуються бук, ялиця та клен-явір. Загалом по деревостану приріст біомаси стабільніший за умови відсутності будь-яких кліматичних змін.

Вдосконалення моделі FORKOME дає підставу стверджувати про можливість і доцільність опрацювання прогнозних передбачень розвитку всихаючих та з ознаками всихання ялинових деревостанів. Наукові пошуки ґрунтуються на потребі наявності більш ранніх попереджень про загрози лісових екосистем, щоб мінімізувати витрати на їх відновлення. Отже, можна зробити висновок про актуальність і необхідність досліджень сучасного санітарного стану ялиників та розроблення їх прогнозування з використанням імітаційних комп'ютерних програм.

### Бібліографічні посилання

- Botkin D. B., Janak F. J., & Wallis, J. R. (1972). Some ecological consequences of computer model of forest growth. *J. Ecol.*, 60, 649-873.
- Hong, S. He., David, J., Mladenoff T., & Crow R. (1999). Linking an ecosystem model and a landscape model to study forest species response to climate warming. *Ecological Modelling*, 114, 213-233.
- Kozak I., & Menshutkin V. (2000). Possibilities of application of computer modelling for prediction of tree stand succession dynamics on the example of fir and beech tree stand in the Bieszczady Mountains. *Forestry*, 3, 113-122 (in Polish).
- Kozak I., Czekańska P., Kozak H., Stepień A., & Kociuba P. (2013). Modeling the dynamics of pine stands in Poland and the Ukrainian part of the Roztochya in the condition of climate change. *Lesne Prace Badawcze*, 74(3), 215-226 (in Polish).
- Kozak I.I., & Parpan V.I. (2006). *Forkome ecological forest computer model*. Ivano-Frankivsk: TSIT PNU (in Ukrainian).
- Szumacher I. (2011). Funkcje terenów zielonej miejskiej a świadczenia ekosystemów. *Prace i Studia Geograficzne*, 46, 169-176 (in Polish).

## Прогнозирование динамики усыхания ельников Карпатского региона с помощью компьютерной модели FORKOME

Т. В. Парпан<sup>1</sup>, И. И. Козак<sup>2</sup>, О. М. Ткачук<sup>3</sup>

Применение на сегодняшний день компьютерных моделей в экологии дает возможность прогнозировать поведение сложных систем, к которым относятся лесные экосистемы. Принимая во внимание специфические условия лесов, анализ их динамики требует использования имитационных компьютерных моделей. Существуют чисто лесные (growth-yield) модели и экологические (gap) модели, которые развивались независимо в течение длительного периода и взаимно дополнялись.

Лесные модели сосредоточены на анализе древесной продукции и не принимали во внимание аспекты изменений лесной среды. Другие экологические модели, которые также часто называют моделями процессов, учитывают изменения лесной среды в прогностических имитациях. Примененная в нашем исследовании модель FORKOME содержит элементы лесных и экологических подходов и была специально разработана для условий Польши и Украины. Это оригинальная компьютерная модель, которая дает возможность прогнозировать возможные изменения в лесах и создана как информационно-прогностическая система, имеющая широкое научное, практическое и познавательное значение.

Прогноз усыхания на основании последней версии имитационной компьютерной модели FORKOME позволил оценить результаты моделирования по биоклиматическим влияниям на появление, выживание, рост и гибель особей ели и других древесных видов. Моделирование проведено на основе результатов одинарной симуляции и статистически усредненного прогноза из 20 симуляций («Monte Carlo») с целью показа тенденции изменений и их соответствия с одинарными симуляциями.

Прогноз динамики древостоя проведен на 20- и 50-летний периоды. В двух случаях моделирование осуществлялось со сценариями «контроль» и «тепло-сухо», как наиболее достоверного к ре-

<sup>1</sup> Парпан Тарас Васильевич – член-корреспондент Лесной академии наук Украины, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Украинский научно-исследовательский институт горного лесоводства им. П. С. Пастернака, г. Ивано-Франковск, 76018 Украина. Тел.: + 38-050-690-08-13. E-mail: tarasparpan@gmail.com

<sup>2</sup> Козак Игорь Иванович – профессор, доктор биологических наук, руководитель кафедры ландшафтной экологии, Люблинский католический университет им. Иоанна Павла II, м. Люблин, Польша. Тел.: +48-814-45-45-31. E-mail: kozakihor58@gmail.com

<sup>3</sup> Ткачук Оксана Михайловна – кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник лаборатории экологии и защиты леса. Украинский научно-исследовательский институт горного лесоводства им. П. С. Пастернака. г. Ивано-Франковск, 76018 Украина. Тел.: + 38-096-957-20-98. E-mail: tkachuk.oksana1988@gmail.com

альным климатических изменениям за последние два десятилетия. Кроме того, проведено моделирование подсадки древесных видов также по сценариям «контроль» и «тепло-сухо» на 50 лет. Обнаружено, что динамика древостоя на 20-летний и 50-летний периоды в контрольном варианте и сценарии «тепло-сухо» аналогична и характеризуется стремительным снижением в первом десятилетии биомассы как следствие выпадения из состава насаждения на разных возрастных стадиях ели и в меньшем количестве – перестойных особей пихты. Установлено, что в контрольном сценарии с подсадкой пихты, ели и бука наиболее активный рост биомассы в течение 50-летнего прогноза показали пихта и бук. Достаточно чутко на потепление и уменьшение осадков отреагировала ель, которая практически выпадает на посаженном участке уже в начале прогноза. Общая биомасса насаждения на контроле в течение 50-летнего прогноза увеличивается более интенсивно по сравнению с сухими и теплыми погодными условиями, при которых она почти в 2 раза меньше в конце прогнозного периода.

Результаты нашего исследования подтверждены полевыми исследованиями и литературными данными, что отображает надежность прогнозов, полученных при использовании компьютерной модели FORKOME. Такие исследования необходимы для рационального ведения лесного хозяйства и принятия соответствующих стратегий развития леса.

**Ключевые слова:** прогноз динамики; биомасса; рост; контроль; «тепло-сухо»; подсадка; реакция на потепление, численность видов.

## Forecasting dynamics of drying out of spruce stands in the Carpathian region using the computer model FORKOME

T. Parpan<sup>1</sup>, I. Kozak<sup>2</sup>, O. Tkachuk<sup>3</sup>

Today, The use of computer models in ecology allows us to predict the behavior of complex systems, which include forest ecosystems. Taking into account the specific conditions of forests, the analysis of their

dynamics requires the use of simulated computer models. There are purely forest (growth-yield) models and ecological (gap) models, which developed independently over a long period and were mutually complementary.

Forest models focus on the analysis of wood products and did not take into account aspects of changes in the forest environment changes. Other ecological models, which are also often called process models, take into account changes in the forest environment in prognostic imitations. The FORKOME model that is presented in the article contains elements of forest and ecological approaches and was specially developed for the conditions of Poland and Ukrainian Carpathians. This is an original computer model that allowing to predict possible changes in forests and is developed created as an information and prognostic system of broad scientific, practical and cognitive importance.

Forecast of drying based on the latest version of the imitation computer model FORKOME allowed to evaluate the results of modeling regarding bioclimatic effects on the appearance, survival, growth and death of spruce and other tree species. The modeling was performed on the basis of a single simulation results and statistically averaged forecast of 20 simulations («Monte Carlo») in order to show the tendency of changes and their correspondence with single simulations.

The forecast of the woodland dynamics was conducted at the 20th and 50th anniversary period. In two cases, simulations were performed with «control» and «warm-dry» scenarios, as the most reliable for real climate change over the past two decades. In addition, simulation of tree species was also conducted in the «control» and «warm-dry» scenarios for 50 years.

It has been revealed that the dynamics of the tree stand dynamics at the 20-year and 50-year periods in the control and heat-dry scenarios is similar and is characterized by a rapid decrease of biomass in the first decade as a result of fir disappearing from the planting composition at different age stages and in a smaller number of overflows fir species. It was revealed that in the control scenario with fir, spruce and beech the most active biomass growth during the 50-year forecast was shown by fir and beech. The spruce reacted relatively sensitively to the warming and decrease of rainfall, which practically disappeared on the planted area at the beginning of the forecast. The total planting biomass on the control during the 50-year forecast increases more intensively comparing to the dry and warmer weather conditions, where it is almost two times lower at the end of the forecast period.

The results of the study article are confirmed by field research and literature data, which reflects the reliability of forecasts obtained using the FORKOME computer model. Such studies researches are essential for sustainable forest management and the adoption of appropriate forest development strategies.

**Key words:** dynamics forecast; biomass; growth; control; «warm-dry»; subplantation; reaction to warming, number of species.

<sup>1</sup> *Taras Parpan* – Corresponding Member of the Forestry Academy of Ukraine, Candidate in Biological sciences, Senior Researcher, Ukrainian Research Institute of Mountain Forestry named after P. S. Pasternak, Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine. Tel.: +38-050-690-08-13. E-mail: tarasparpan@gmail.com

<sup>2</sup> *Ihor Kozak* – Professor, Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Landscape Ecology, The John Paul II Catholic University of Lublin, Lublin, Poland. Tel.: +48-814-45-45-31. E-mail: kozakihor58@gmail.com

<sup>3</sup> *Oksana Tkachuk* – Candidate of Agricultural Sciences, Junior Researcher of the laboratory of ecology and forest protection. Ukrainian Research Institute of Mountain Forestry named after P. S. Pasternak, Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine. Tel.: +38-096-957-20-98. E-mail: tkachyk.oksana1988@gmail.com