

ЕКОЛОГІЯ І МОНІТОРИНГ

УДК: 630.561.24

<https://doi.org/10.33220/1026-3365.137.2020.62>



**І. Ф. БУКША, Т. С. ПИВОВАР, В. П. ПАСТЕРНАК,
М. І. БУКША, О. І. ЛЯЛІН, Т. І. БУКША**

ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ ПАТЕРСОНА ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ КЛІМАТУ НА ПОТЕНЦІЙНУ ПРОДУКТИВНІСТЬ ЛІСІВ УКРАЇНИ

Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького

В умовах зміни клімату важливо отримати достовірний прогноз стану та продуктивності лісів на середньострокову та довгострокову перспективу. Наведено результати моделювання потенційної продуктивності лісів (PP) із використанням моделі (індексу) Патерсона (CVP) у базовому, сучасному кліматі та майбутніх кліматичних умовах за сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5 у XXI сторіччі в Україні з урахуванням лісогосподарського районування за С. А. Генсіруком. Результати моделювання проаналізовано за допомогою кореляційного аналізу отриманих значень та шляхом зіставлення з фактичною продуктивністю головних лісоутворювальних порід (дуба звичайного, сосни звичайної, ялини європейської, бука лісового, вільхи чорної та берези повислої) за середнім бонітетом і середньою зміною запасу. Виявлено значущу лінійну кореляцію обох показників для більшості порід (крім вільхи чорної та ялини європейської) з показником потенційної продуктивності за Патерсоном. Використання моделі Патерсона в умовах зміни кліматичних показників дає змогу прогнозувати динаміку потенційної продуктивності лісів в Україні у разі зміни клімату на рівні природних зон і лісогосподарських областей, проте для отримання точніших прогнозів необхідно враховувати типологічні, едафічні та морфометричні особливості лісових ділянок і вплив на лісостани біотичних чинників, зокрема шкідників та хвороб лісу.

Ключові слова: проєкт EURO-CORDEX, сценарій RCP 4.5, сценарій RCP 8.5, модель CVP, середня зміна запасу, бонітет, головні лісоутворювальні породи.

Вступ. В умовах зміни клімату важливо отримати достовірний прогноз стану та продуктивності лісів на середньострокову та довгострокову перспективу, який є необхідним для планування заходів із запобігання зміні клімату та адаптації лісів (Gebler et al. 2007). Результати метеорологічних спостережень свідчать, що середня температура в Україні за останні десять років підвищилася в різних природо-кліматичних зонах на 0,3–0,6°C, а за останні 100 років – на 0,7°C (Palamarchuk et al. 2017). Приріст деревостанів є інтегральним показником, який певним чином характеризує реакцію дерев лісових порід на зміну довкілля. Зміна клімату впливає на стійкість лісів та їхню здатність реагувати на мінливість кліматичних чинників (Shvidenko et al. 2018). В Україні тривалий час досліджують вплив клімату на ріст деревних рослин (Lakyda & Moroziuk 2011, Koval & Borysova 2019).

Кліматичні зміни призводять до значних змін біологічної продуктивності (Pasternak 2011). За останні 50 років, згідно з дослідженнями (Shvidenko et al. 2008), приріст лісів у помірному кліматі збільшувався на 0,2–0,5 % на рік. Математичне моделювання широко застосовують під час дослідження лісових екосистем, зокрема їхньої продуктивності. Методи вивчення потенційної продуктивності (Lositskiy & Chuyenkov 1980) можна розподілити на три основні групи: лісівничо-таксаційні, лісотипологічні й кліматологічні. Найпоширенішими є лісівничо-таксаційні, за допомогою яких вивчають закономірності будови й росту насаджень, що є основою подальшого моделювання цих параметрів. Такі методи застосовують для конкретних умов виростання, тоді як кліматологічні методи оцінювання можуть охоплювати великі території.

Кліматологічні методи визначення продуктивності базуються на залежності потенційної продуктивності від кліматичних факторів. Зазвичай кілька гідротермічних показників клімату комбінують в один комплексний показник, так званий кліматичний індекс приросту, який зіставляють із річним приростом деревостану. Наприклад, кліматичний індекс 'Т' Дж. Векка (Weck 1955) містить у собі/охоплює опади 'N', середню температуру повітря 'T', кількість днів із опадами до 0,1 мм 'n' протягом травня – липня, кількість днів у році з додатними температурами 'Z'.

У 1956 р. шведський вчений С. С. Патерсон розробив модель *кліматичної продуктивності рослинності CVP* (Climate Vegetation Productivity), яку розглядають як об'єктивний метод оцінювання потенційної продуктивності будь-якої лісової рослинності залежно від кліматичних чинників (Paterson 1956). Патерсон зазначав, що продуктивність лісу на ділянці визначається переважно кліматичними факторами, наприклад, сонячною радіацією, сприятливою температурою, опадами та тривалістю вегетаційного періоду в будь-яких регіонах, де сформувалися ґрунти. Модель (індекс) CVP розроблено для прогнозування максимального потенційного приросту деревини за запасом. Цей індекс часто використовують у дослідженні потенційної продуктивності лісів, зокрема в Іспанії (Benavides et al. 2009), Італії (Diodato & Bellocchi 2020), Китаї (Gao et al. 2019) із прийнятними результатами на регіональних рівнях. Для території України до теперішнього часу такі дослідження не проводили.

Мета дослідження – провести моделювання потенційної продуктивності лісів України за різних кліматичних сценаріїв та порівняти результати з фактичною продуктивністю лісоутворювальних порід у лісогосподарських областях.

Матеріали й методи. Дослідження проведено в лабораторії моніторингу і сертифікації лісів УкрНДЛГА у 2020 р. з використанням моделі (індексу) CVP Патерсона (Paterson 1956).

Основою дослідження були кліматичні дані E-OBS (для базового кліматичного періоду 1961–1990 рр. та сучасного клімату 1990–2010 рр.) та регіональні кліматичні моделі проєкту EURO-CORDEX (EURO-CORDEX) для майбутнього клімату за новітніми сценаріями зміни клімату RCP 4.5 та RCP 8.5. Для території України сформовано віртуальну мережу з понад 7 тисяч ділянок, для кожної з яких наведено кліматичні дані (минулих часових періодів і прогнозів на період до 2100 р.). Зміни клімату та характеристики лісів вивчали в регіональному аспекті – в межах лісогосподарських областей за С. А. Генсіруком (Gensiruk et al. 1981). Засобами Q-GIS побудовано карти динаміки (рис. 1) потенційної продуктивності за Патерсоном для базового кліматичного періоду, сучасного клімату та двох кліматичних сценаріїв (RCP 4.5 та RCP 8.5) для таких часових періодів: 2021–2040 рр., 2041–2060 рр., 2081–2100 рр. Зміни показника оцінювали відносно базової кліматичної норми 1961–1990 рр.

Індекс CVP Патерсона обраховували за формулою (1):

$$CVP = \frac{V \times P \times G \times E}{A \times 12} \quad (1)$$

де V – максимальна середня температура найтеплішого місяця, °С;

P – річна сума опадів, мм;

G – тривалість вегетаційного сезону, місяців;

E – коефіцієнт інсоляції – сонячна радіація, отримана на полюсі, виражена у відсотках від отриманої радіації на широті місця дослідження;

A – різниця між середньою місячною, максимальною та мінімальною температурами, °С.

Тривалість вегетаційного сезону (G , місяців) оцінювали згідно з критерієм (Benavides et al. 2009, Diodato & Bellocchi 2020, Rahman & Akter 2015), за яким вегетаційний сезон містить/охоплює лише місяці із середньою температурою від 6°С і достатньою кількістю опадів (значення індексу де Мартона (I , мм/°С), що визначається за формулою (2), вище 20).

$$I = \frac{12 \times P}{T + 10} \quad (2)$$

де P – сумарна кількість опадів за місяць, мм;

T – середня місячна температура, °С.

Закордонні дослідження (Benavides et al. 2009, Diodato & Bellocchi 2020) показали доцільність заміни коефіцієнта інсоляції E на показник f (Gandullo 1994), який краще відображає порівняно невеликий просторовий масштаб досліджень. Показник f урахує фактичну інсоляцію через n_{sun} ; його розраховують за формулою (3):

$$f = \frac{2500}{(n_{sun} + 1000)} \quad (3)$$

де n_{sun} – річна тривалість сонячного сйва, годин.

Потенційну продуктивність PP ($m^3 \text{ га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$) розраховували за допомогою рівняння (4), розробленого Патерсоном (Paterson 1956) та перевіреного іншими дослідниками (Benavides et al. 2009, Gao et al. 2019 та ін.).

$$PP = 5,20 \log CVP - 7,25 \quad (4)$$

де PP – максимальний потенційний середній річний приріст деревостанів за запасом ($m^3 \text{ га}^{-1} \text{ рік}^{-1}$), або потенційна продуктивність.

Мінімальні, максимальні та середні значення показників наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Кліматичні показники, що увійшли до моделі, та їхні значення

Показник	Мінімум	Максимум	Середнє
Максимальна середня температура найтеплішого місяця (V , °C)	13,53	29,28	21,80
Річна сума опадів (P , мм)	340,18	1 157,67	607,66
Тривалість вегетаційного сезону (G , місяців)	0,00	9,00	5,52
Показник інсоляції Гандулло-Серрада (f)	0,71	0,95	0,85
Різниця між середньою місячною, максимальною та мінімальною температурами (A , °C)	19,57	28,34	23,75
Індекс Патерсона (CVP)	0,00 25,68**	685,28	236,98

**Значення $CVP = 25,68$ є мінімальним для застосованої моделі потенційної продуктивності (значення $PP > 0$). При $CVP \leq 25,68$ значення PP умовно взято за 0.

Для Південного степу – у степовій частині Кримського півострова та у Причорномор'ї – значення показника тривалості вегетаційного сезону G дорівнювало 0, оскільки протягом усіх місяців рівень зволоження за індексом де Мартона був низьким, а відтак індекс CVP також мав нульове значення. У зв'язку із цим неможливо було розрахувати потенційну продуктивність PP для цих територій, і вони одержали значення $PP = 0$. Виявилось, що значення $CVP = 25,68$ є граничним для застосованої моделі. Значення потенційної продуктивності при $CVP \leq 25,68$ умовно дорівнює 0.

Результати моделювання потенційної продуктивності перевірено шляхом кореляційного аналізу із середньою зміною запасу головних лісоутворювальних порід за даними обліку лісів на рівні лісогосподарських областей України (Gensiruk et al. 1981). Потенційну продуктивність вз фактичною порівнювали для семи найпоширеніших лісоутворювальних порід в Україні: сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.), дуба звичайного (*Quercus robur* L.) вегетативного та насінневого походження, бука лісового (*Fagus sylvatica* L.), ялини європейської (*Picea abies* (L.) Karst.), берези повислої (*Betula pendula* Roth), вільхи чорної (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) та граба звичайного (*Carpinus betulus* L.).

Із метою оцінювання фактичної продуктивності лісів узагальнено середні лісотаксаційні показники досліджених лісоутворювальних порід для 297 лісогосподарських підприємств і семи лісогосподарських областей (дані повидільної бази даних «Лісовий фонд» станом на 01.01.2011). До аналізу включено всі деревостани, в яких були наявні досліджені деревні породи – від трьох одиниць у складі й вище. Запас деревостанів перераховували на чисті деревостани (за часткою породи у складі) і розраховували середньозважений середній запас на гектарі, середньозважений вік деревостанів за породами, середньозважений клас бонітету

та середню зміну запасу як результат ділення середнього запасу на гектарі на середній вік деревостану.

Статистичний аналіз виконано за допомогою програми IBM SPSS Statistics.

Результати та обговорення. Узагальнені результати розрахунку потенційної продуктивності (PP) за Патерсоном (Paterson 1956) за сценаріями зміни клімату в лісогосподарських областях України наведено в таблиці 2 та на рисунку 1. Різниця даних за зазначеними сценаріями в межах кожної лісогосподарської області виявилася достовірною ($p < 0,01$).

Таблиця 2

Значення середньої потенційної продуктивності лісостанів у лісогосподарських областях, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$

Часовий період/ сценарій	Карпати	Полісся	Право-бережний Лісостеп	Лівобережний Лісостеп	Гірський Крим	Північний Степ	Південний Степ	Україна
1961–1990	5,81 ± 0,05	4,93 ± 0,01	4,57 ± 0,09	3,59 ± 0,21	2,46 ± 0,51	2,00 ± 0,11	0,19 ± 0,07	3,96 ± 0,1
1991–2010	5,78 ± 0,05	5,23 ± 0,02	5,03 ± 0,08	4,43 ± 0,07	3,39 ± 0,29	2,46 ± 0,22	0,14 ± 0,06	4,32 ± 0,1
RCP 4.5 2021–2040	6,08 ± 0,04	5,51 ± 0,02	5,26 ± 0,08	4,69 ± 0,05	3,91 ± 0,26	2,98 ± 0,21	0,39 ± 0,13	4,62 ± 0,1
RCP 4.5 2041–2060	6,16 ± 0,04	5,48 ± 0,03	5,21 ± 0,09	4,59 ± 0,06	3,90 ± 0,24	2,35 ± 0,19	0,54 ± 0,18	4,53 ± 0,1
RCP 4.5 2081–2100	6,29 ± 0,04	5,49 ± 0,03	5,18 ± 0,11	4,19 ± 0,09	4,12 ± 0,20	2,17 ± 0,17	0,91 ± 0,18	4,51 ± 0,1
RCP 8.5 2021–2040	6,09 ± 0,04	5,46 ± 0,02	5,23 ± 0,07	4,65 ± 0,05	3,55 ± 0,28	2,62 ± 0,22	0,27 ± 0,12	4,53 ± 0,1
RCP 8.5 2041–2060	6,29 ± 0,04	5,54 ± 0,03	5,11 ± 0,1	4,61 ± 0,05	3,74 ± 0,28	2,41 ± 0,22	0,56 ± 0,15	4,55 ± 0,1
RCP 8.5 2081–2100	7,00 ± 0,05	6,55 ± 0,04	6,17 ± 0,1	5,31 ± 0,09	4,02 ± 0,14	3,18 ± 0,12	1,48 ± 0,17	5,42 ± 0,1

Виявлено, що в базовому кліматичному періоді (1961–1990 рр.) лісогосподарські області достовірно різнилися за потенційною продуктивністю: з максимумом у Карпатах ($5,8 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$) і мінімумом у Південному Степу ($0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$), середня потенційна продуктивність у країні становила близько $4 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$.

За значенням потенційної продуктивності лісостанів лісогосподарські області утворюють такий ряд у міру зменшення продуктивності: Карпати, Полісся, Правобережний Лісостеп, Лівобережний Лісостеп, Гірський Крим, Північний Степ, Південний Степ.

Як зазначено в методиці, у Південному Степу була наявна значна територія з нульовою потенційною продуктивністю внаслідок існування дефіциту вологи протягом вегетаційного сезону, що створює несприятливі умови для лісової рослинності.

Розрахунки, проведені для сучасного клімату (1991–2010 рр.), показали, що, порівнюючи з базовим кліматичним періодом, відбулося збільшення середнього значення потенційної продуктивності лісів для країни (на $0,3 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$). Для лісогосподарських областей відзначено збільшення потенційної продуктивності в рівнинній частині України (до $5,2 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$ у Поліссі, до $5 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$ у Правобережному Лісостепу та до $4,4 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$ у Лівобережному Лісостепу) за винятком Південного степу, де відбулося зменшення значень показника від $0,19$ до $0,14 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$. Продуктивність лісів у Карпатах у сучасному кліматі змінилася несуттєво.

За результатами моделювання потенційної продуктивності лісів за обома кліматичними сценаріями виявлено (див. табл. 2) тенденцію до продовження поступового росту потенційної продуктивності лісів, проте характер змін залежатиме від сценарію та часового періоду. Виявлені тенденції триватимуть: до середини сторіччя потенційна продуктивність за RCP 4.5 зросте відносно базового кліматичного періоду на 14,4 %, за RCP 8.5 – на 14,9 %.

Так, за RCP 8.5 значення PP зростатиме протягом сторіччя в усіх лісогосподарських областях: загалом для України в найближчому майбутньому та в середині сторіччя PP

становитиме $4,5 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$, а наприкінці сторіччя сягне $5,4 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$. Суттєві зміни очікуються, зокрема, в Південному Степу, однак для більшості періодів буде характерною низька продуктивність лісів у регіоні внаслідок дефіциту вологості. Суттєве збільшення потенційної продуктивності лісів за сценарієм на кінець сторіччя пов'язане як із істотним зростанням температури повітря та збільшенням рівня опадів, так і зі збільшенням тривалості вегетаційного сезону (за рахунок зменшення морозного періоду).

За кліматичним сценарієм RCP 4.5 значення PP також зростатимуть, проте меншою мірою: найбільші зміни прогнозують у найближчому майбутньому (PP = 4,6 для України), потім потенційна продуктивність дещо знизиться (до $4,5 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$), але ці значення будуть більшими, ніж у базовому чи сучасному кліматі. За лісогосподарськими областями найбільші зміни відбудуться в Карпатах, Гірському Криму та Південному Степу.

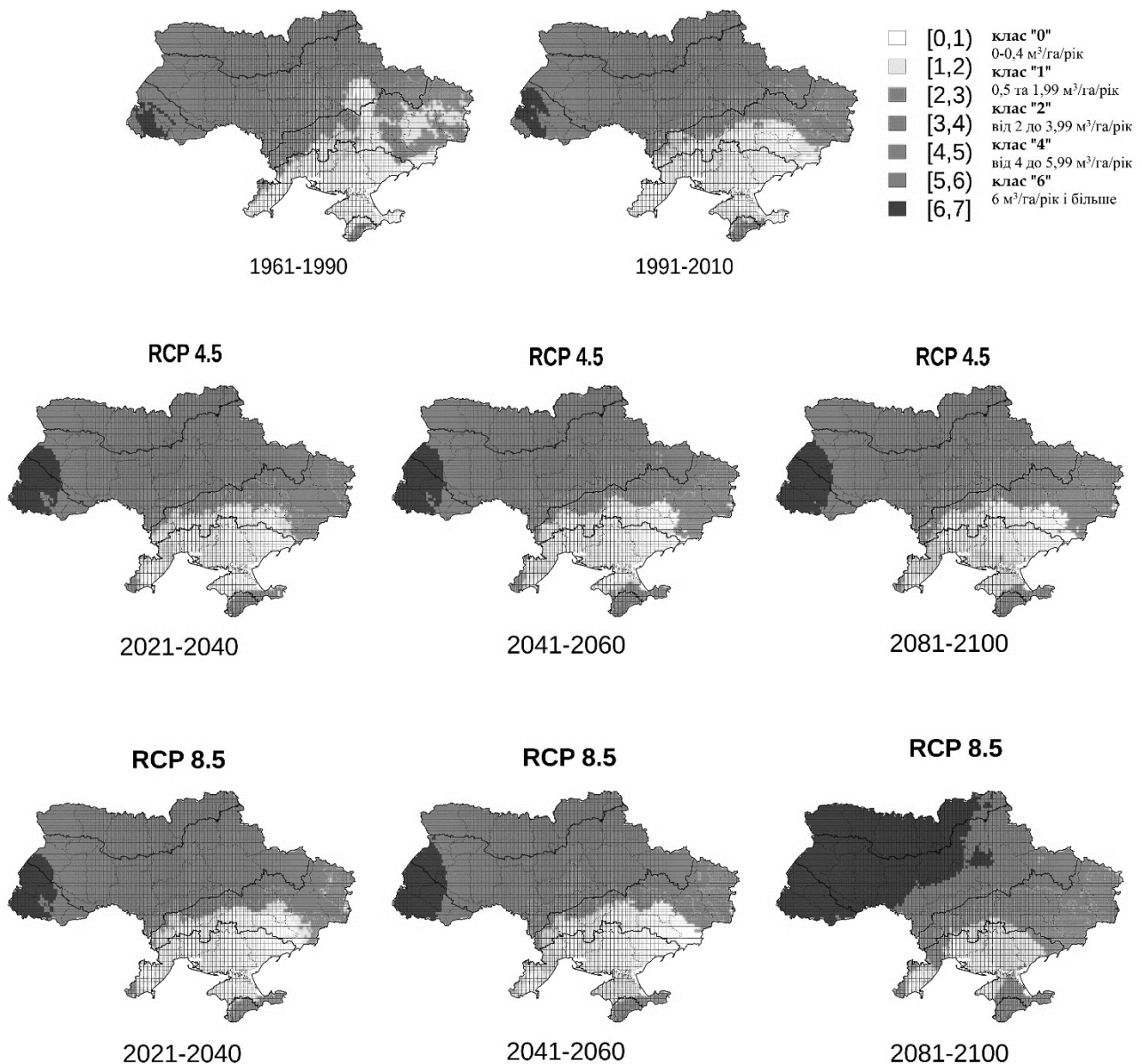


Рис.1 – Динаміка потенційної продуктивності лісів (PP) за різних сценаріїв зміни клімату, $\text{м}^3 \text{га}^{-1} \text{рік}^{-1}$

З метою здійснення просторового аналізу динаміки змін PP за площею виділено такі класи: «0» – із дуже низькою продуктивністю (значення PP знаходяться в межах $0,0-0,4 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$), «1» – із низькою продуктивністю (від $0,50$ до $1,99 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$), «2» –

середньо-продуктивні ($2,00\text{--}3,99 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$), «4» – продуктивні (від $4,00$ до $5,99 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$), «6» – високопродуктивні (від $6 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$ і більше).

Аналіз просторової динаміки показника РР виявив, що в базовому періоді (1961–1990 рр.) та сучасному кліматі в Південному Степу розташована зона класу «0» (близько 7 % території країни). У сучасному кліматі відзначено зменшення площ класів «1» та «2» на 2,3 і 8,5 %, які становлять 15,3 і 16,0 % території відповідно. Більш продуктивний за показником РР клас «4» збільшився на 9,4 %, охопивши тим самим 58,5 % території країни. Найпродуктивніший клас «6», який зафіксований у Карпатах, зріс за площею поширення вдвічі та становить 3,0 % загальної площі території України.

Аналіз динаміки РР за сценарієм RCP 4.5 виявив, що впродовж 2021–2100 рр. площі класу «0» зменшаться від 4,2 до 1,2 %, причому зростуть площі класів «1» на 5,5 % (від 14,0 до 19,5 %) і «2» на 11,4 % (від 13,6 до 25,0 %). Відповідно клас «4» зменшиться на 16,8 % (від 62,1 до 45,3 %). При цьому найпродуктивніший клас «6» матиме сталу тенденцію до зростання впродовж усіх трьох часових періодів і збільшиться на 2,8 % (від 6,1 до 8,9 %).

За сценарієм RCP 8.5 до кінця сторіччя в межах України класу «0» не залишиться взагалі, його замінить клас «1», який зменшиться на 5,5 % (від 17,2 до 11,7 %). Суттєво – на 35,9 % (від 60,0 до 21,4 %) – зменшиться й площа класу «4». При цьому площа класу «2» зросте на 10,5 % (від 11,8 до 22,3 %), а найбільш суттєво зросте площа класу «6» – на 35,8 % (від 6,0 до 41,8 %).

Аналогічну тенденцію до збільшення значень потенційної продуктивності за цими кліматичними сценаріями виявили дослідження в Італії (Diodato & Bellocchi 2020), Іспанії (Benavides et al. 2009), Китаї (Gao et al. 2019) та Бангладеш (Rahman & Akter 2015).

Згідно з даними зарубіжних досліджень (Kaufmann et al. 2011, Woolf et al. 2016), збільшення температури та концентрації CO_2 призводить до зростання активності фотосинтезу, проте такий позитивний ефект нівелюють катастрофічні наслідки від збільшення частоти та інтенсивності лісових пожеж, появи осередків шкідників і хвороб, посилення негативних наслідків для лісів унаслідок впливу посух та екстремальних погодних явищ.

Показник бонітет лісу (від лат. *bonitas* – доброякісність) – це опосередкований показник продуктивності насаджень, що визначають за шкалами, які проф. М. М. Орлов ще на початку ХХ століття запропонував на основі походження (насіннєве й вегетативне), віку та середньої висоти насадження (Myroniuk et al. 2017).

У таблицях 3 та 4 наведено результати розрахунків фактичної продуктивності деревостанів основних лісоутворювальних порід України для лісогосподарських областей за даними лісовпорядкування. Ці результати надалі використано для порівняння з даними потенційної продуктивності.

За середніми значеннями класу бонітету всіх порід лісогосподарські області можна розмістити в такий ряд у міру зменшення показника: Карпати, Правобережний Лісостеп, Полісся та Лівобережний Лісостеп, Північний Степ, Південний Степ, Гірський Крим.

Виявлено, що для таких лісогосподарських областей, як Карпати, Полісся, Правобережний і Лівобережний Лісостеп, середній клас бонітету деревостанів вищеназваних порід у межах ареалу становить I,8 і вище, за винятком дуба звичайного вегетативного походження (II клас бонітету і нижче). Через різноманітні едафічні умови та біологічні особливості порід у Північному Степу насадження ростуть як за I,6 (сосна звичайна), так і за II класом бонітету (береза повисла, вільха чорна, граб звичайний та дуб звичайний насіннєвого походження). Південний Степ через посушливі умови є менш придатним для росту деревних порід, а відтак і класи бонітету тут є дещо нижчими: у вільхи чорної та сосни звичайної це II,8, а в граба звичайного та дуба звичайного – нижчі за III клас. Втім варто відзначити доволі високий I,7 бонітет деревостанів берези повислої, але поясненням того можуть бути локальні сприятливі умови для цієї породи, що сформувалися на незначних площах. Деревостани дуба звичайного вегетативного походження як в умовах Північного,

так і Південного Степу ростуть переважно за III класом бонітету. Умови Гірського Криму для всіх порід, окрім ялини європейської, забезпечили продуктивність на рівні III класу з невеликими відмінностями.

Таблиця 3

Середній клас бонітету деревостанів досліджених порід за лісогосподарськими областями

Деревні породи*	Лісогосподарська область							Україна
	Карпати	Полісся	Право-бережний Лісостеп	Лівобережний Лісостеп	Гірський Крим	Північний Степ	Південний Степ	
Бкл	Ia,9 ± 0,06	I,4 ± 0,11	Ia,6 ± 0,06	–	III,3 ± 0,10	–	–	I,0 ± 0,04
Бп	I,4 ± 0,06	I,7 ± 0,05	I,2 ± 0,05	I,0 ± 0,07	III,7 ± 0,16	II,1 ± 0,07	I,7 ± 0,12	I,6 ± 0,02
Влч	I,7 ± 0,06	I,8 ± 0,05	I,3 ± 0,05	I,2 ± 0,07	III,0 ± 0,17	II,2 ± 0,08	II,8 ± 0,11	I,7 ± 0,03
Гз	I,4 ± 0,06	I,8 ± 0,04	I,4 ± 0,04	I,2 ± 0,09	III,9 ± 0,10	II,2 ± 0,09	III,6 ± 0,26	I,6 ± 0,03
Дз, вег.	II,6 ± 0,07	II,0 ± 0,04	II,3 ± 0,04	II,1 ± 0,06	III,5 ± 0,12	III,3 ± 0,04	III,2 ± 0,07	II,4 ± 0,02
Дз, нас.	I,4 ± 0,06	I,8 ± 0,04	I,5 ± 0,04	I,6 ± 0,06	III,7 ± 0,14	II,8 ± 0,05	III,2 ± 0,06	I,6 ± 0,02
Сз	Ia,6 ± 0,06	I,4 ± 0,04	Ia,9 ± 0,04	I,1 ± 0,05	III,7 ± 0,11	I,6 ± 0,05	II,8 ± 0,08	I,3 ± 0,02
Яле	I,0 ± 0,06	Ia,9 ± 0,05	Ia,6 ± 0,04	Ia,7 ± 0,07	–	–	–	I,0 ± 0,03
Всі породи	I,1 ± 0,02	I,5 ± 0,02	I,3 ± 0,02	I,5 ± 0,02	III,6 ± 0,05	II,4 ± 0,02	II,6 ± 0,04	I,5 ± 0,01

*Бкл – бук лісовий, Бп – береза повисла, Влч – вільха чорна, Гз – граб звичайний, Дз – дуб звичайний, Сз – сосна звичайна, Яле – ялина європейська; вег. – вегетативне походження, нас. – насінневе походження.

Серед досліджених деревних порід найвищий I клас бонітету мають деревостани ялини звичайної та бука лісового. Дещо нижчу, але доволі високу продуктивність на рівні I,3–I,7 бонітету мають сосна звичайна, береза повисла, граб звичайний, вільха чорна. I лише дуб звичайний вегетативного походження характеризується, порівнюючи з іншими породами, нижчим (II,4) класом бонітету.

Зміна запасу – величина, на яку змінюється значення запасу частини деревостану, що росте (Муроніук et al. 2017). У цій роботі ми досліджували середню річну зміну запасу ($\Delta^{\circ}M$) вищеназваних основних лісоутворювальних деревних порід. Значення цього показника для всієї території України становило $4,0 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік (табл. 4), що цілком відповідає отриманій потенційній продуктивності для України (див. табл. 2) за період кліматичної норми, за якої росли більшість лісів України.

Таблиця 4

Середня річна зміна запасу головних лісових порід за лісогосподарськими областями, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік

Породи*	Лісогосподарська область							Україна
	Карпати	Полісся	Правобережний Лісостеп	Лівобережний Лісостеп	Гірський Крим	Північний Степ	Південний Степ	
Бкл	4,2 ± 0,1	2,5 ± 0,6	3,9 ± 0,1	–	2,4 ± 0,2	–	–	4,1 ± 0,1
Бп	3,8 ± 0,1	3,6 ± 0,1	3,7 ± 0,1	3,9 ± 0,1	1,6 ± 0,3	3,0 ± 0,1	2,6 ± 0,2	3,7 ± 0
Влч	3,3 ± 0,1	3,7 ± 0,1	3,9 ± 0,1	4,3 ± 0,1	2,5 ± 0,4	3,5 ± 0,2	3,0 ± 0,2	3,8 ± 0,1
Гз	3,5 ± 0,1	3,4 ± 0,1	3,6 ± 0,1	3,2 ± 0,1	1,9 ± 0,2	2,8 ± 0,2	2,2 ± 0,5	3,5 ± 0
Дз, вег.	2,4 ± 0,1	3,4 ± 0,1	2,8 ± 0,1	3,0 ± 0,1	1,1 ± 0,2	2,3 ± 0,1	1,5 ± 0,1	2,8 ± 0
Дз, нас.	3,2 ± 0,1	3,1 ± 0,1	3,5 ± 0,1	3,5 ± 0,1	2,1 ± 0,4	2,3 ± 0,1	1,8 ± 0,1	3,3 ± 0
Сз	5,5 ± 0,2	4,5 ± 0,1	5,1 ± 0,1	5,0 ± 0,1	2,3 ± 0,4	4,6 ± 0,1	3,5 ± 0,2	4,7 ± 0,1
Яле	5,5 ± 0,2	5,4 ± 0,1	5,5 ± 0,1	6,1 ± 0,2	–	–	–	5,5 ± 0,1
Всі породи	4,6 ± 0,1	4,1 ± 0,1	3,9 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,1 ± 0,3	3,0 ± 0,1	2,6 ± 0,2	4,0 ± 0

*Бкл – бук лісовий, Бп – береза повисла, Влч – вільха чорна, Гз – граб звичайний, Дз – дуб звичайний, Сз – сосна звичайна, Яле – ялина європейська; вег. – вегетативне походження, нас. – насінневе походження.

Зазначимо, що з досліджуваного переліку деревних порід ялина європейська та бук лісовий представлені не в усіх лісогосподарських областях, ростуть у максимально сприятливих для них умовах і мають вищі за середнє по країні значення $\Delta^{\circ}M$ 5,5 та $4,1 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік відповідно. Серед інших порід, що представлені в усіх лісогосподарських областях,

єдиною породою, що перевершила середнє значення по країні, є сосна звичайна ($\Delta^c M = 4,7 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік). Найнижчий показник виявлено у дуба звичайного вегетативного походження – $2,8 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік.

Серед лісогосподарських областей найвищі значення середньої зміни запасу для всіх порід визначено в Карпатах і Поліссі ($4,6$ і $4,1 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік відповідно), і ці значення є меншими, ніж потенційна продуктивність у цих регіонах у 1961–1990 рр. (див. табл. 2). Тотожним виявилось значення для Лівобережного Лісостепу – $4,0 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік, і дещо меншим для Правобережного Лісостепу – $3,9 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік. Суттєво, майже вдвічі, нижчими виявилися значення середньої зміни запасу на півдні країни: у Південному Степу ($2,6 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік) та Гірському Криму ($2,1 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік).

Найвищі значення середньої зміни запасу в умовах Карпат, Полісся, Лівобережного та Правобережного Лісостепу виявлено в ялини європейської ($5,4$ – $6,1 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік) та сосни звичайної ($4,5$ – $5,5 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік). У Гірському Криму найвищі показники виявлено для вільхи чорної ($2,5 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік) та бука лісового ($2,4 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік). В умовах Степу найбільшою продуктивністю характеризуються насадження сосни звичайної ($3,5$ – $4,6 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік) та вільхи чорної ($3,0$ – $3,5 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ за рік).

На рівні лісогосподарських підприємств проведено кореляційний аналіз між показниками потенційної продуктивності за кліматичними даними за період 1961–1990 рр. та показниками фактичної продуктивності деревостанів (табл. 5).

Таблиця 5

Результати кореляційного аналізу даних потенційної продуктивності (PP) за кліматичними даними (1961–1990 рр.) та фактичними показниками середнього значення бонітету та середньої річної зміни запасу досліджуваних порід

Коефіцієнт кореляції	Дз, вег.	Дз, нас.	Бкл	Бп	Влч	Гз	Сз	Яле
PP та бонітет	-0,653**	-0,740**	-0,520**	-0,094	-0,165*	-0,448**	-0,589**	-0,059
PP та середня річна зміна запасу	0,519**	0,668**	0,352**	0,283**	0,026	0,381**	0,452**	0,008

Примітки: Дз, вег. – дуб звичайний вегетативного походження; Дз, нас. – дуб звичайний насінневого походження; Бкл – бук лісовий, Бп – береза повисла, Влч – вільха чорна, Гз – граб звичайний, Сз – сосна звичайна, Яле – ялина європейська.

*Значущі при $P = 0,05$;

**Значущі при $P = 0,01$.

Виявлено значущий негативний зв'язок (див. табл. 5) середньозваженого класу бонітету з потенційною продуктивністю для всіх досліджуваних порід, окрім берези повислої та ялини європейської. У зв'язку з тим, що для середнього класу бонітету, який у міру збільшення його величини означає погіршення умов росту лісової породи, негативний кореляційний зв'язок свідчить про покращення умов (зменшення значення бонітету) зі збільшенням значень кліматичного показника, і навпаки – позитивний зв'язок свідчить про погіршення умов зі збільшенням значень кліматичного показника.

Показано значущу лінійну кореляцію середньої зміни запасу більшості порід (крім вільхи чорної та ялини європейської) залежно від показника потенційної продуктивності за Патерсоном. Найбільший коефіцієнт кореляції зі зміною запасу виявлено для дуба звичайного, що має насінневе походження. Позитивний зв'язок свідчить про збільшення середньої зміни запасу в міру зростання показника потенційної продуктивності.

Значні кореляційні зв'язки потенційної продуктивності з біологічною продуктивністю було отримано в дослідженні китайських вчених (Gao et al. 2019).

Проте необхідно враховувати, що фактична продуктивність деревостанів залежить від ґрунтово-кліматичних умов, а також впливу екзогенних (зовнішніх) та ендегенних (внутрішніх) факторів, таких як антропогенні чинники, стихійні явища, біотичні пошкодження внаслідок спалахів осередків шкідників і хвороб лісу, вплив яких суттєво збільшиться у разі підвищення рівня температурного режиму та зростання посушливості

клімату. Слід зазначити, що прогнозоване зростання продуктивності є розрахунковим і не враховує умов місцезростання, рельєфу, вологості та багатства ґрунтів, рівнів засоленості, мікрокліматичних особливостей, тому для більшої достовірності отримані прогнози слід доповнити даними відповідних досліджень на локальному рівні.

Наші попередні дослідження показали, що прогнозовані кліматичні умови загалом будуть несприятливими для основних лісоутворювальних деревних порід (Shvidenko et al. 2018) у зв'язку з можливими порушеннями гомеостазу в результаті кліматичних змін та дисбалансу в динамічній рівновазі лісових екосистем, тому передчасно робити однозначні висновки щодо очікуваних змін у продуктивності лісостанів лише на підставі проведеного моделювання з допомогою індексу Патерсона. Необхідні подальші дослідження з метою вивчення впливу на динаміку продуктивності деревостанів комплексу факторів – як кліматичних, так і біотичних та едафічних.

Висновки. Проведені визначення показника потенційної продуктивності лісів за моделлю (індексом) Патерсона дали змогу виявити закономірності динаміки продуктивності лісів залежно/відповідно до лісогосподарських областей та природних зон України для минулого, сучасного та майбутніх часових періодів. Порівнюючи з базовим кліматичним періодом 1961–1990 рр., у сучасному кліматі збільшилися значення потенційної продуктивності – в середньому на $0,3 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$ (на 7,5 %). За обома сценаріями зміни клімату (RCP 4.5 та RCP 8.5), тенденція до збільшення потенційної продуктивності існуватиме і в майбутньому, проте характер змін буде різним залежно від сценарію та часового періоду: до середини сторіччя за сценарієм RCP 4.5 потенційна продуктивність зросте на 14,4 %, за сценарієм RCP 8.5 – на 14,9 % відносно базового кліматичного періоду; наприкінці сторіччя ці зміни становитимуть 13,9 та 36,9 % відповідно.

Виявлено значущу лінійну кореляцію показників фактичної продуктивності лісів (середнього класу бонітету та середньої зміни запасу) для більшості досліджених порід (крім вільхи чорної та ялини європейської) з показником потенційної продуктивності за Патерсоном для базового кліматичного періоду 1961–1990 рр.

Використання індексу Патерсона в умовах зміни кліматичних показників дає можливість прогнозувати динаміку потенційної продуктивності лісів в Україні внаслідок зміни клімату на рівні природних зон та лісогосподарських областей, проте для отримання більш точних прогнозів (наприклад, для окремих лісогосподарських підприємств) необхідно враховувати типологічні, едафічні та морфометричні особливості лісових ділянок, а також комплекс біотичних факторів, які суттєво впливають на стан і продуктивність лісів на локальному рівні.

Подяка. Автори статті висловлюють подяку Світовому банку за підтримку дослідження «Оцінка впливу, можливостей та пріоритетів зміни клімату в Україні», завдяки якому було отримано доступ до кліматичних даних, що використані під час підготування цієї публікації. Також автори вдячні канд. фіз.-мат. наук с. н. с. С. В. Краковській (зав. лабораторії прикладної кліматології Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України) за консультування та допомогу під час оброблення та аналізування кліматичних даних.

ПОСИЛАННЯ – REFERENCES

- Benavides, R., Roig, S., Osoro, K.* 2009. Potential productivity of forested areas based on a biophysical model. A case study of a mountainous region in northern Spain. *Annals of Forest Science*, 66 (1):1. DOI: 10.1051/forest/2008080.
- Diodato, N. and Bellocchi, G.* 2020. Spatial probability modelling of forest productivity indicator in Italy. *Ecological Indicators*, Elsevier, 108: 105721. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105721>.
- Gao, W.-Q., Lei, X.-D., Fu, L.-Y.* 2019. Impacts of climate change on the potential forest productivity based on a climate-driven biophysical model in northeastern China. *J. For. Res.*, 31: 2273–2286. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00999-6>.
- Gandullo, J. M.*, 1994. *Climatología y Ciencia del Suelo*, Universidad Politécnica de Madrid, Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid.

Gebler, A., Keitel, C., Kreuzwieser, J. [et al.]. 2007. Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate (Review). *Trees-Structure and Function*, 21(1): 1–11.

Gensiruk, S. A., Shevchenko, S. V., Bondar, V. S. et al. 1981. Integrated forestry zoning of Ukraine and Moldova. Kyiv, Naukova dumka, 360 p. (in Russian).

Kaufmann, R. K., Kauppi, H., Mann M. L., Stock, J. H. 2011. Reconciling Anthropogenic Climate Change with Observed Temperature 1998–2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(29): 11790–11793. DOI: 10.1073/pnas.1102467108.

Koval, I. M. and Borysova, V. L. 2019. Ash radial growth response to climate change in the stands of Left bank forest-steppe. *Scientific Bulletin of UNFU*, 2: 56–57 (in Ukrainian).

Lakyda, P. I. and Morozziuk, O. V. 2011. Cherkasy region forests: bioproductivity and dynamics. *Korsun-Shevchenkivskiy*, 222 p. (in Ukrainian).

Lositskiy, K. B. and Chuyenkov, V. S. 1980. Reference forest stands. Moscow, Lesnaya promyshlennost, 192 p. (in Russian).

Myronyuk, V. V., Svinchuk, V. A., Lyalin, O. I. 2017. Synopsis of lectures on the subject 'Forest Taxation. Kharkiv, O. M. Beketov NUUE, 99 p. (in Ukrainian).

Rahman, M. S. and Akter, S. 2015. Climate to Forest Productivity: Implication of Paterson's CVP Index. *Research Journal of Forestry* 9 (2): 27–34. DOI: 10.3923/rjf.2015.27.34.

Palamarchuk, L. V., Hnatiuk, N. V., Krakovska, S. V., Shedemenko, I. P., Diukel, H. O. 2010. Seasonal climate change in Ukraine in XXI century. *Scientific works of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute*, 259: 104–120 (in Ukrainian).

Pasternak, V. P. 2011. Bioproductivity of forests of the northeast of Ukraine in the context of climate change. Extended abstract of Doctoral thesis. Kyiv, 46 p.

Paterson, S. S. 1956. The forest area of the world and its potential productivity. Doctoral thesis. Göteborg, Goteburg University Press, Sweden.

Shvidenko, A. Z., Buksha, I. F., Krakovska, S. V. 2018. Vulnerability of Ukranian forests to climate change. Kyiv, Nika-Center, 184 p.

Shvidenko, A. Z., Shchepashchenko, D. G., Nilsson S., Buluy, Yu. I. 2008. Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia (standard and reference materials). 2nd Ed. Moscow, Federal Agency of Forest Management, 886 p.

Weck, J. 1955. *Forstliche Zuwachs und Ertragskunde*. Radebeul und Berlin, Neumann Verlag, 160 s.

Woolf, D. K., Land, P. E., Shutler, J. D., Goddijn-Murphy, L. M., Donlon, C. J. 2016. On the calculation of air-sea fluxes of CO₂ in the presence of temperature and salinity gradients. *J. Geophys. Res. Oceans*, 121: 1229–1248. <https://doi.org/10.1002/2015JC011427>.

Buksha I. F., Pyvovar T. S., Pasternak V. P., Buksha M. I., Lialin O. I., Buksha T. I.

APPLICATION OF THE PATERSON MODEL TO ASSESS CLIMATE CHANGE IMPACT ON THE POTENTIAL PRODUCTIVITY OF UKRAINIAN FORESTS

Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest melioration named after G. M. Vysotsky

In the changing climate, it is essential to obtain a reliable forecast of the condition and productivity of forests in medium and long terms. The results of modelling the potential productivity of forests (PP) using the Paterson model/index (CVP) in the baseline, current climate and future climate according to the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios in the 21st century in Ukraine are presented in terms of forest zoning according to Gensiruk. To verify the simulation results, a correlation analysis of the obtained values was performed. The simulation results were compared with the actual productivity of the main forest-forming species (English oak, Scots pine, Norway spruce, European beech, black alder, and silver birch) according to the indicators of average site index (bonitet) and an average stock change. A significant linear correlation of both indicators for most species, except black alder and Norway spruce, with the Paterson potential productivity index is shown.

The use of the Paterson index in the context of changing climatic indicators allows predicting the dynamics of potential forest productivity in Ukraine during climate change at the level of natural zones and forestry areas. However, to obtain more accurate forecasts it is necessary to take into account typological, edaphic and morphometric features of forest areas as well as impact of pests and diseases on the forests stands.

Key words: EURO-CORDEX project, RCP 4.5 scenario, RCP 8.5 scenario, CVP model, average growing stock change, site index, main forest-forming species.

E-mail: buksha@uriffm.org.ua

Одержано редколегією: 16.11.2020