

УДК 630.181.28

**І. Ф. БУКША, М. А. БОНДАРУК, О. Г. ЦЕЛІЩЕВ, Т. С. ПИВОВАР,  
М. І. БУКША, В. П. ПАСТЕРНАК\***

**ПРОГНОЗ ЖИТТЄЗДАТНОСТІ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ І ДУБА ЗВИЧАЙНОГО  
У РАЗІ ЗМІНИ КЛІМАТУ В РІВНИННІЙ ЧАСТИНІ УКРАЇНИ**

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

Розроблено методику та проведено оцінювання задовільності умов середовища для сосни звичайної та дуба звичайного у XXI столітті за умови реалізації сценарію зміни клімату МГЕЗК А1В на основі трьох провідних кліматичних факторів: вологості, континентальності та криоклімату. З допомогою геоінформаційної системи Q-GIS проведено моделювання впливу змін клімату на життєздатність ценопопуляцій вказаних порід на основі моделі амплітуд толерантності флори за зазначеними кліматичними факторами. Встановлено, що для досліджених деревних порід найбільш критичним (лімітуювальним) фактором є вологість клімату. За прогнозом очікується значне звуження зони оптимального росту за цим показником у 2080–2100 рр. і поява значних площ із несприятливими умовами для росту досліджених деревних порід (більшою мірою для сосни, ніж для дуба), що підвищує ймовірність зміни зональних типів рослинності плакорів. У місцях із несприятливими кліматичними умовами очікується зниження продуктивності зазначених лісоутворювальних порід, поступова втрата ними репродуктивної здатності й можливості природного поновлення, порушення сезонного розвитку, зниження стійкості до шкідників і хвороб, збільшення ризиків пошкодження пожежами. Ключові слова: зміна клімату, дуб звичайний, сосна звичайна, амплітуда толерантності, задовільність умов середовища, кліматичні фактори.

**Вступ.** Найбільшою глобальною екологічною проблемою сьогодення є підвищення концентрації парникових газів в атмосфері, зокрема вуглекислого газу, що є провідною причиною глобальної зміни клімату (IPCC 2013). У V оцінювальній доповіді Міжурядової групи експертів з питань зміни клімату (МГЕЗК) вказується на уповільнення глобального потепління на початку XXI сторіччя, однак згідно з дослідженням, опублікованим у авторитетному журналі *Science* (Karl et al. 2015), цей висновок був неправильним через неврахування нерівномірного розподілу вимірювань на території Землі, а насправді зниження швидкості потепління в цьому сторіччі не відбулося. Глобальна температура Землі вже зросла на 0,8 °C проти доіндустріального періоду, що призвело до численних і значних проблем – зростання мінливості погоди, збільшення частоти теплових хвиль, повеней, природних пожеж, масових спалахів шкідників, нестачі води, зміни в режимі опадів тощо. Сучасна динаміка теплового режиму згідно з моделюванням призведе до підвищення температури приблизно на +4 °C до 2100 р. (La Querre et al. 2015.). Такий рівень зростання середньорічної температури на планеті може спричинити некеровані зміни у довкіллі, зокрема досягнення екосистемами «межі переключення» на великих територіях, коли незначні зовнішні впливи спричиняють корінні й незворотні зміни стану та структури природних екосистем, у т. ч. лісів. За такого розвитку подій у майбутньому без заходів щодо пом'якшення зміни клімату є висока ймовірність збільшення глобальної температури на 6 °C (Earth Statement 2015).

На самміті ООН із захисту клімату, який відбувся у 2015 р. у Парижі (Conference on Climate Change 2015), була поставлена довгострокова мета – утримати глобальне потепління на рівні до 2 °C і спрямувати зусилля, щоб зупинити його на рівні 1,5 °C. Понад 100 країн вже погодилися вживати заходи для досягнення цієї мети, що буде потребувати зменшення до нуля викидів парникових газів на планеті до 2050 р. Для цього потрібно забезпечити перехід від використання викопного палива до відновлюваних джерел енергії.

Важлива роль в утриманні екологічного балансу планети, зокрема в пом'якшенні кліматичних змін, відводиться лісам (Didukh 2011). У 2016 р. Верховна рада України ратифікувала Паризьку угоду (закон № 1469–VIII від 14.07.2016), в якій передбачається необхідність збереження та збільшення поглиначів і накопичувачів парникових газів, зокрема лісів.

\* © І. Ф. Букша, М. А. Бондарук, О. Г. Целіщев, Т. С. Пивовар, М. І. Букша, В. П. Пастернак, 2017

**Актуальність досліджень.** Потенційна можливість виконання лісовими екосистемами глобальних екологічних функцій залежить від інтенсивності проявів зміни клімату в різних регіонах, адаптаційних можливостей основних лісоутворювальних порід, спроможності підтримання стійкості лісових екосистем комплексом лісогосподарських заходів (Buksha 2010, Temperli et al. 2012). Стрімка зміна клімату може негативно вплинути на ліси, тому вивчення цієї проблеми має дуже важливе значення для забезпечення належного реагування та ухвалення обґрунтованих рішень щодо управління в лісовому господарстві в умовах високої невизначеності. В Україні вплив зміни клімату на ліси досліджували науковці УкрНДЦЛГА (Buksha et al. 1998, 2014, 2015, Buksha 2010) та Інституту екології Карпат (Stoyko 2009), але методи моделювання впливу зміни клімату на життєздатність лісових порід розроблені ще недостатньо. Всебічне вивчення та систематизація особливостей прояву зміни клімату в різних природних регіонах України, оцінювання уразливості лісів до очікуваної (прогнозованої) зміни клімату є важливою умовою для розроблення оптимальної стратегії мінімізації наслідків такого впливу, сталого управління лісами та невиснажливого лісокористування в умовах зміни навколишнього природного середовища (Buksha et al. 1998).

*Мета досліджень:* моделювання та оцінювання впливу зміни клімату на життєздатність ценопопуляцій сосни звичайної і дуба звичайного в рівнинних умовах України за сценарієм МГЕЗК А1В (Specialnij doklad MGEIK 2000) на початок, середину та кінець XXI сторіччя у порівнянні з кліматичною нормою (1961–1990 рр.).

**Матеріали й методи.** Як основний використано сценарій зміни клімату МГЕЗК А1В (Specialnij doklad MGEIK 2000), який вважають найбільш імовірним кліматичним сценарієм за рівнем антропогенного впливу на клімат планети.

Джерелом кліматичних даних слугували регіональні кліматичні моделі проекту *EU-FP6 ENSEMBLES* (<http://ensembles-eu.metoffice.com>) та набір просторово розподілених даних щодо температури і опадів E-OBS з проекту *ECA&D* (<http://www.ecad.eu>), наведені у публікації (Haylock et al. 2008), а також регіональні кліматичні моделі (Krakovska et al. 2011). Для оцінювання територіальних відмінностей у змінах клімату на території України було використано підхід, запропонований науковцями Українського гідрометеорологічного інституту (УкрГМІ), щодо поділу території країни на 5 регіонів за подібністю фізико-географічних умов, однотипністю прояву кліматоутворювальних чинників, відносною однорідністю температури та опадів і з урахуванням адміністративно-територіального поділу держави. Виділено такі регіони: Західний (Закарпатська, Львівська, Івано-Франківська, Волинська, Рівненська, Тернопільська, Чернівецька та Хмельницька області), Північний (Житомирська, Київська, Чернігівська та Сумська області), Східний (Харківська, Донецька та Луганська області), Південний (АР Крим, Одеська, Миколаївська, Херсонська та Запорізька області) і Центральний (Вінницька, Кропивницька, Черкаська, Полтавська і Дніпропетровська області).

Засобами *Q-GIS* було побудовано карти динаміки кліматичних показників для базового періоду (1961–1990 рр. – кліматична норма, 1991–2010 рр. – за фактичними даними метеостанцій) та карти за кліматичним сценарієм А1В для таких часових періодів: 2011–2030 рр., 2031–2050 рр., 2081–2100 рр. (індекси континентальності Іванова, індекси аридності Іванова та показники середньої температури найхолодніших місяців, що характеризують кріоклімат, або суворість зим). Для оцінювання кліматичних впливів на уразливість лісів було визначено біоекологічні характеристики для дуба звичайного та сосни звичайної – основних порід рівнинної частини України. Уразливість лісів розглядали в регіональному аспекті.

У дослідженнях нами було застосовано розроблені Я. П. Дідухом шкали екологічних (кліматичних) амплітуд видів природної флори України (Didukh & Plyuta 1994, Didukh 2011), зокрема основних лісоутворювальних порід України. Під час моделювання змін клімату використовували аналогічні методи оцінювання кліматичних індексів (аридності або

гумідності (омброрежиму, *Om*), континентальності (континентального клімату, *Kn*) і суворості зими (кріоклімату, *Cr*) та шкали кліматичних амплітуд цих факторів для досліджених порід, що є важливою умовою коректного оцінювання толерантності сосни звичайної та дуба звичайного до показників кліматичних змін. Методика проведення детально викладена у публікації І. Ф. Букші зі співавторами (Buksha et al. 2017).

Континентальність клімату розраховували за формулою Іванова (Ivanov 1959): фітоіндикаційна шкала цього фактора має 17 градацій від екстра-океанічного (до 61 %) до ультра-континентального (> 210 %) клімату (Didukh 2011). Україна розміщена на межі геміокеанічного клімату (120 %) – західна Україна та чорноморське узбережжя – і субконтинентального клімату (150 %) – степова зона чорноморського регіону. Цей показник є нижчим в Карпатах (110 %), де клімат є субокеанічним.

Вологість (*Om*) відбиває аридність – гумідність клімату. Цей фактор характеризує вологість повітря і пов'язаний із кількістю опадів, випаровуванням і транспірацією, вологістю ґрунту, рівнем ґрунтових вод тощо (Konstantinov 1968, Metody izucheniya 1981). Індекс вологості інтегрує вплив опадів і термальних ресурсів території. Визначається як різниця між річною кількістю опадів і випаровуванням за методом Іванова (Ivanov 1957).

Шкала вологості має 23 градації – від гіперарідофітного (< -2 200 мм) до гіперомброфітного (> 2 000 мм) клімату (Didukh 2011). Цей показник варіюється в Україні від семіомброфітного (1 000 мм) в Карпатах до мезоарідофітного (-700 мм) на південному узбережжі Криму, що включає 35 % шкали.

Кріоклімат (*Cr*) відбиває кріорежим клімату. Головними метеорологічними елементами, що впливають на зимівлю рослин, є температура повітря та сніговий покрив. Характеристикою зимових екстремальних умов є середня температура найхолодніших місяців (в Україні це найчастіше січень, іноді – лютий). На основі цього індексу була розроблена фітоіндикаційна шкала кріорежиму. Шкала має 15 градацій і характеризується коливаннями температур найхолодніших місяців – від гіперкріофітного клімату (< -34°C) до термофітного клімату (> +18°C), постійно високих температур у тропічній зоні (Didukh 2011). Ці показники змінюються в Україні від -8°C (субкріофітний) до +4°C (акріофітний).

Показники біоекологічних характеристик (величину і положення медіани амплітуди толерантності) сосни звичайної та дуба звичайного використовували для визначення їхніх екогруп і місць знаходження значень зон оптимуму, субоптимальних зон і зон песимуму відносно значень кліматичних показників (Bondaruk & Tselishev 2015), а також для створення оцінювальної шкали задовільності умов середовища.

Для побудови картографічних моделей впливу змін клімату на життєздатність ценопопуляцій зазначених лісоутворювальних порід використовували коефіцієнт задовільності умов середовища (*КС*), який змінюється від 100 % у центрі екологічної амплітуди толерантності виду до 0 на її межі та розраховується за формулою (1) Д. М. Циганова (Tsyganov 1983):

$$КС_{med} = \frac{2x-1}{a} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $КС_{med}$  – середнє значення коефіцієнта задовільності умов середовища;

$x$  – порядковий номер певного типу режиму фактора від найближчої межі амплітуди;

$a$  – кількість елементарних режимів цього екологічного фактора, які охоплює амплітуда толерантності виду.

Водночас розрахунок *КС* за наведеною формулою відповідає необхідній точності розрахунків лише за умови, якщо амплітуда толерантності виду охоплює непарну кількість типів режимів, тобто середнє значення амплітуди толерантності виду визначається цілим числом. У разі парної кількості типів режимів, коли середнє значення амплітуди толерантності виду є нецілим числом, через екстраполяцію до цілого виникає похибка, яка в окремих випадках (залежно від довжини амплітуди толерантності) може перевищувати 10 %. Тому нами

запропоновано замість порядкового номеру типу режиму фактора  $x$  використовувати відстань  $d$  від значення режиму фактора до найближчої межі толерантності виду:

$$КС_{med} = \frac{2d - 1}{a} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де  $КС_{med}$  – середнє значення коефіцієнта задовільності умов середовища;

$d$  – відстань (у балах) від значення режиму фактора, для якого розраховується  $КС$ , до найближчої межі амплітуди толерантності виду;

$a$  – кількість елементарних режимів певного екологічного фактора, які охоплює амплітуда толерантності виду.

Кількість елементарних режимів певного екологічного фактора  $a$ , які охоплює амплітуда толерантності виду, розраховували за формулою (3):

$$a = x_{max} - x_{min} + 1, \quad (3)$$

де  $x_{max}$  – максимальне значення (у балах) амплітуди толерантності виду для певного екологічного фактора;

$x_{min}$  – його мінімальне значення (у балах).

Відстань від значення режиму фактора, для якого розраховується  $КС$ , до мінімальної ( $d_1$ ) або максимальної ( $d_2$ ) межі амплітуди толерантності виду визначали за формулами (4–5):

$$d_1 = x - x_{min} + 1, \quad (4)$$

$$d_2 = x_{max} - x + 1, \quad (5)$$

де  $x$  – значення режиму фактора (у балах), для якого розраховується  $КС$ ;

$x_{max}$  – максимальне,  $x_{min}$  – мінімальне значення (у балах) амплітуди толерантності виду для певного екологічного фактора.

Для розрахунку коефіцієнта задовільності умов середовища  $КС$  для певного значення  $x$  режиму фактора використовували значення  $d_1$  або  $d_2$  залежно від того, яка межа амплітуди толерантності виду для цього значення режиму була найближчою.

Ступінь задовільності умов кліматичного середовища для видів за окремими екологічними факторами визначали з використанням коефіцієнтів задовільності умов середовища  $КС$  за такою шкалою (табл. 1).

Таблиця 1

**Шкала задовільності умов кліматичного середовища  
(за коефіцієнтом задовільності умов середовища  $КС$ )**

КС	Умови	Характеристика
91–100 %	Оптимальні	Висока життєздатність популяції виду з максимальними значеннями продуктивності, умовно I <sup>a</sup> –I бонітет
71–90 %	Субоптимальні	Певне зменшення продуктивності до I–II бонітету за достатньо високої життєздатності
51–70 %	Задовільні	Зменшення продуктивності (фітомаси, запасу, приросту тощо) виду до II–III бонітету на фоні його стійкого існування
21–50%	Малозадовільні	Зменшення продуктивності до III, інколи до III–IV бонітету, погіршення санітарного стану, зменшення конкурентоздатності
1–20 %	Екстремальні	Істотне зменшення продуктивності до III–IV, інколи до IV–V бонітету, наступне погіршення санітарного стану, порушення циклу фенологічного розвитку, поступова втрата репродуктивної здатності, можливості природного відновлення, стійкості до шкідників і хвороб, конкурентоздатності
До 1 %	Межування і розрив екологічних амплітуд виду і меж амплітуд екологічних факторів	Регресія популяції тим більша, чим більша відстань розходження крайніх значень амплітуд, продуктивність не більше IV–V бонітету, незадовільний санітарний стан, ушкодження шкідниками і хворобами, втрата репродуктивної здатності, порушення циклу онтогенезу та втрата ценозотвірної функції. У таких випадках виділяються лімітувальні кліматичні фактори (рівень яких наближається до меж або виходить за межі толерантності виду)

Приклад розрахунку коефіцієнта задовільності умов кліматичного середовища КС для дуба звичайного за фактором континентальності клімату *Kn* наведено у табл. 2.

Таблиця 2

**Задовільність умов кліматичного середовища для дуба звичайного\* за континентальністю клімату *Kn***

<i>Kn</i> , %	100	110	120	130	140	150	160	170
<i>x</i> (бал)*	5,4	6,4	7,4	8,4	9,4	10,4	11,4	12,4
<i>a</i>	15	15	15	15	15	15	15	15
<i>d</i>	4,4	5,4	6,4	7,4	7,6	6,6	5,6	4,6
$КС_{meds}$ %	52,0	65,3	78,7	92,0	94,7	81,3	68,0	54,7
Умови	Задо- вільні	Задо- вільні	Суботи- мальні	Оптималь- ні	Оптималь- ні	Суботи- мальні	Задо- вільні	Задо- вільні

\*Амплітуда толерантності (Didukh 2011): min – 2 бали; max – 16 балів.

Запропоновані нами методи розрахунку КС дають можливість оперувати не тільки цілими значеннями, але й дробовими величинами, які відповідають проміжним значенням між ступенями режимів факторів. Це є важливим для виявлення напрямку, динаміки режимів факторів навіть під час їхньої зміни в межах одного ступеня шкал режимів екологічних факторів.

На картографічних матеріалах здійснено моделювання змін співвідношення площ із різними за задовільністю кліматичними умовами для дуба звичайного та сосни звичайної для таких часових періодів: 1961–1990, 1991–2010, 2011–2030, 2031–2050, 2081–2100 рр. за наведеними вище кліматичними індексами. Зроблено прогнозне оцінювання позитивності або негативності сценаріїв динаміки кліматичних умов для цих лісоутворювальних порід, встановлено тенденції розвитку лісової рослинності як для рівнинної України загалом, так і для її природних зон або частин (центральної, східної, західної, південної та північної).

**Результати та обговорення.** Згідно з прогнозом за сценарієм МГЕЗК *A1B* у більшості регіонів України на кінець століття очікується суттєве потепління та аридизація, а також зсув меж зон волого- та теплозабезпечення у напрямку з півдня на північ. Так, у середині ХХІ століття на рівнинній території на Заході та Півночі кліматичні умови будуть подібними до умов, які були у Центрі станом на 1961–1990 рр. Водночас у Центрі та на Сході умови будуть подібні до сучасного клімату на Півдні. Подібні зміни пояснюються, по-перше, безпосередньо ростом температури протягом вегетації, і по-друге, подовженням вегетаційного періоду у порівнянні з кліматичною нормою.

Оцінено значення біоекологічних характеристик (величини і положення медіани амплітуди толерантності) сосни звичайної (*Pinus silvestris*) і дуба звичайного (*Quercus robur*), їхньої екогрупи та місця знаходження значень зон оптимуму, субоптимальних зон і зон песимуму відносно значень кліматичних показників (табл. 3, 4). За відношенням до режиму континентальності клімату обидві породи належать до однієї євритопної екогрупи субконтиненталів, їхні популяції адаптовані до стійкого існування в дуже широкому діапазоні умов (більше 0,75 шкали фактора, або *Kn* = 61 – понад 210 %).

За відношенням до режиму кріоклімату сосна звичайна і дуб звичайний мають трохи вужчі, проте відносно великі екологічні амплітуди й належать до двох гемієвритопних груп субкріофітів та гемікріофітів (амплітуди від 0,51 до 0,75 шкали фактора, або *Cr* дорівнює -30...10°C та -22...10°C відповідно). Найбільш вузькими гемістенотопними амплітудами толератності (від 0,25 до 0,50 шкали фактору) сосна звичайна і дуб звичайний характеризуються щодо вологості клімату, причому сосна звичайна є мезоомброфітом (*Om* = -400...1600 мм), а дуб звичайний, хоч і має трохи меншу амплітуду толерантності, проте є субаридофітом (*Om* = -600...800 мм), пристосованим до порівняно більш посушливих екологічних умов. Лімітувальним фактором для дуба звичайного є вологість клімату, оскільки за двома іншими показниками умови для цієї деревної породи є

сприятливими (від оптимальних до субоптимальних) майже на всій території рівнинної України згідно з даними 1961–1990 рр. (рис. 1–2).

Таблиця 3

**Біоекологічні характеристики сосни звичайної**

Екогрупа	Шкали, одиниця вимірювання	Амплітуда толерантності	Екологічний оптимум	Субоптимальні зони	Зони песимумів
<b>Вологість клімату (омброрежим, <i>Om</i>)</b>					
Мезоомброфіт, гемістенотоп	Бал*	11–20	14,2–16,8	11,8–14,1 16,9–19,2	11,0–11,7 19,3–20,0
	Абс., мм	-400...1600	300...900	-150...300 900...1350	-400...-150 1350...1600
<b>Кріоклімат (морозність, <i>Cr</i>)</b>					
Субкріофіт, геміевритоп	Бал*	3–12	6,2–8,8	3,8–6,1 8,9–11,2	3,0–3,7 11,3–12,0
	Абс., °С	-30...10	-15...-5	-25...-15 -5...5	-30...-25 5...10
<b>Континентальність клімату (контрасторежим, <i>Kп</i>)</b>					
Геміконтинентал, евритоп	Бал*	2–17	7,3–11,7	3,2–7,2 11,8–15,8	2,0–3,1 15,9–17,0
	абс., %	61...> 210	116...165	76...115 166...205	61...75 206 ... >210

\* Бал за (Didukh 2011)

Таблиця 4

**Біоекологічні характеристики дуба звичайного**

Екогрупа	Шкали, одиниця вимірювання	Амплітуда толерантності	Екологічний оптимум	Субоптимальні зони	Зони песимумів
<b>Вологість клімату (омброрежим, <i>Om</i>)</b>					
Субаридофіт, гемістенотоп	Бал*	10–16	12,1–13,9	10,5–12,0 14,0–15,5	10,0–10,4 15,6–16,0
	Абс., мм	-600...800	-100...300	-400...-100 300...600	-600...-400 600...800
<b>Кріоклімат (морозність, <i>Cr</i>)</b>					
Гемікріофіт, геміевритоп	Бал*	5–12	7,5–9,5	5,6–7,4 9,6–11,4	5,0–5,5 11,5–12,0
	Абс., °С	-22...10	-10...-2	-18...-10 -2...6	-22...-18 6...10
<b>Континентальність клімату (контрасторежим, <i>Kп</i>)</b>					
Геміконтинентал, евритоп	Бал*	2–16	6,9–11,1	3,1–6,8 11,2–14,9	2,0–3,0 15,0–16,0
	Абс., %	61...210	111...160	76...110 161...195	61...75 196...210

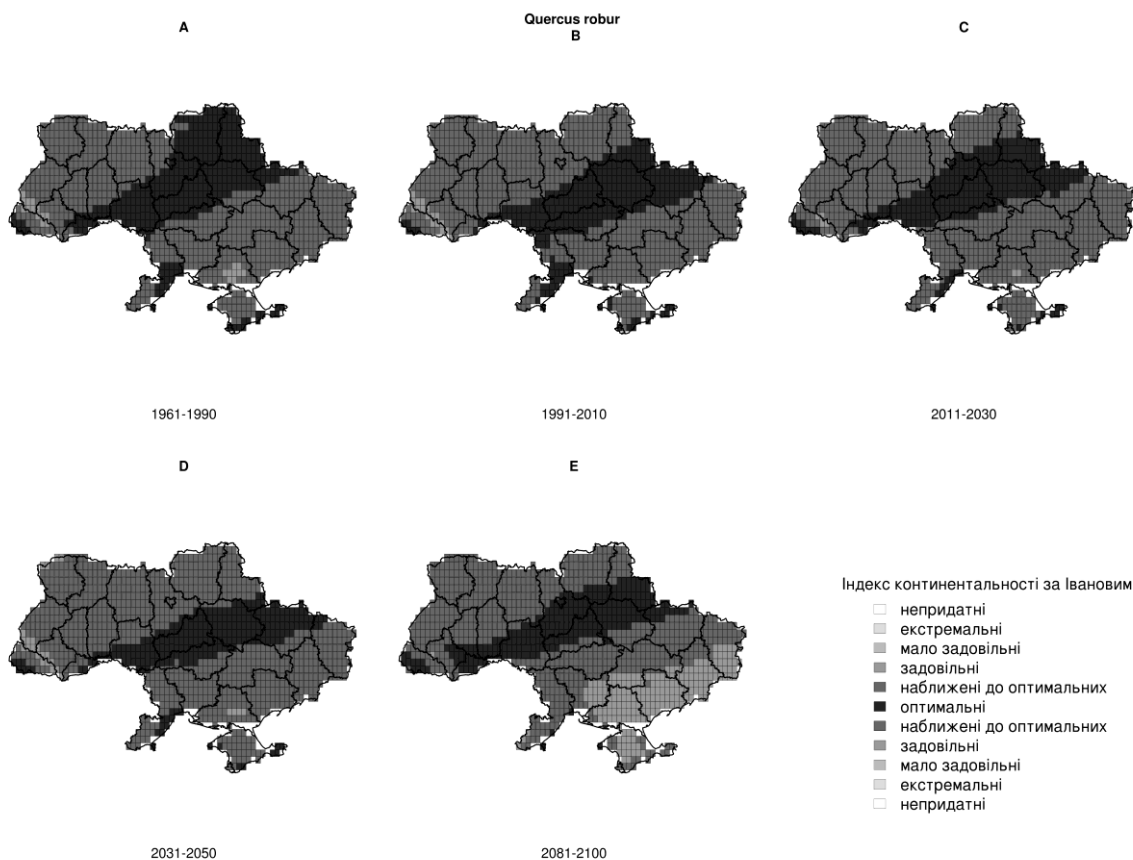
\* Бал за (Didukh 2011)

У 1961–1990 рр. за показником вологості дуб звичайний міг рости майже скрізь на рівнинній частині України. Зона оптимуму для цієї породи була доволі широкою й охоплювала західний регіон, північ і частково центр (Вінниччина), а субоптимальна зона співпадала з південною межею лісостепу. У межах Степу умови були малозадовільними, а в південному степу – екстремальними.

У сучасному кліматі зони оптимуму та субоптимуму звузились і пересунулися на захід, також змістилася межа задовільних умов у північно-західному напрямку. На півдні умови втратили придатність для росту дуба.

Згідно зі сценарієм *A1B* надалі триватиме зсув меж зон у північно-західному напрямку, і вже у середині століття площа незадовільних для дуба умов охопить 26 % території України

(на півдні, частково у центрі та на сході). А наприкінці століття сприятливі для росту дуба умови (оптимальні та субоптимальні) залишаться лише на заході – у Карпатах та передгір'ї, а задовільні – на Львівщині, на решті території сучасної зони мішано-широколистяних лісів умови для дуба будуть малозадовільними і навіть екстремальними (зона непридатних умов становитиме 56 %).



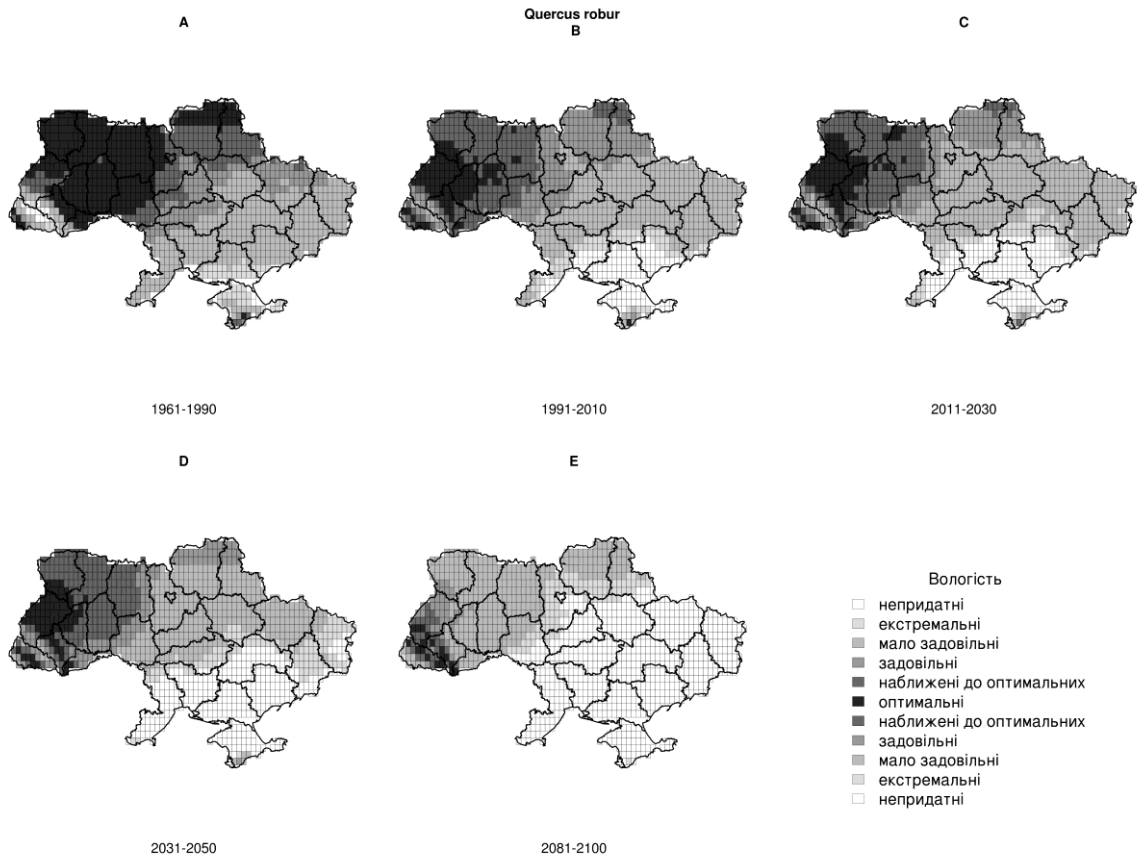
**Рис. 1 – Хронологічна динаміка задовільності умов середовища за показниками континентальності клімату за Івановим для дуба звичайного: А – кліматична норма (1961–1990 рр.); В – сучасний клімат (1991–2010 рр.); С – прогноз (за сценарієм *A1B*) на 2011–2030 рр.; D – прогноз на 2031–2050 рр.; E – прогноз на 2081–2100 рр.)**

Отже, вже в середині ХХІ століття слід очікувати суттєві зміни стану дубових лісів у всій Україні. Імовірно, у таких умовах дубові деревостани зберуться лише локально в місцях неглибокого залягання ґрунтових вод, у заплавах місцевостях, уздовж річок і водойм. За подібних кліматичних сценаріїв може змінитися зональна рослинність плакорів.

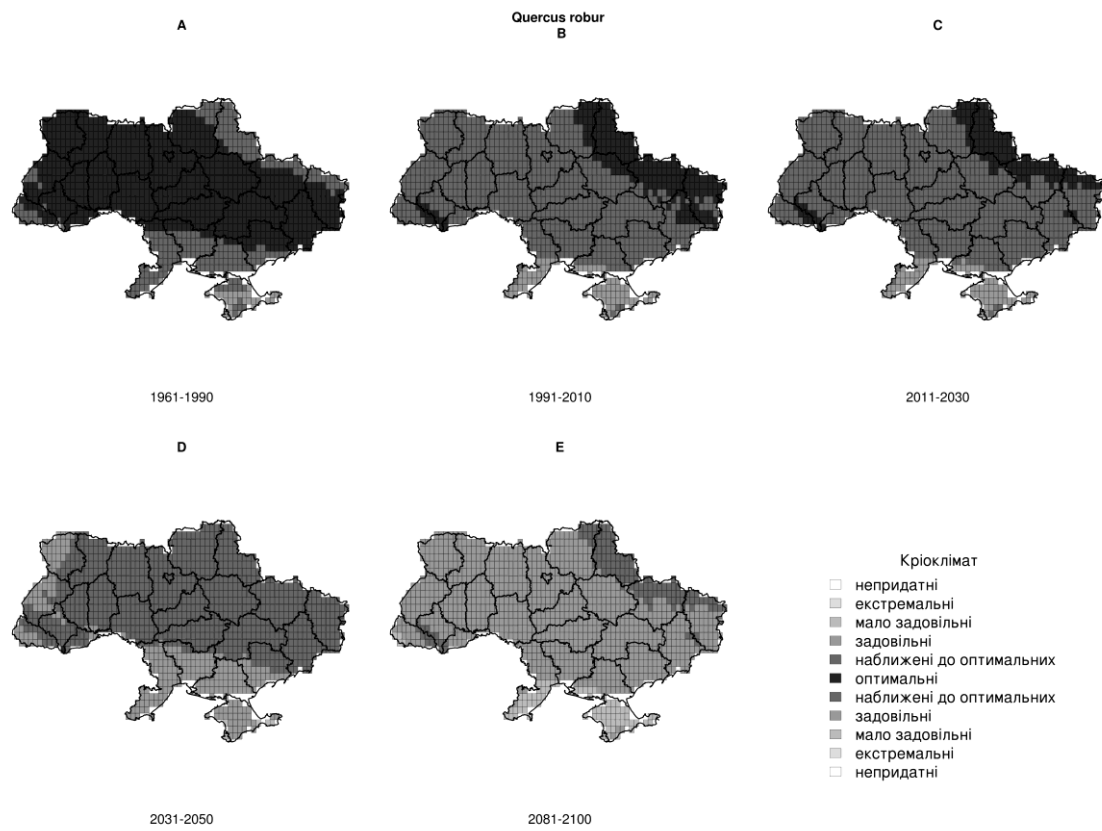
За показником континентальності клімату умови для сосни є сприятливими (оптимальними та субоптимальними) по всій Україні, а за показником кріоклімату – субоптимальними та задовільними. Ріст сосни звичайної в Україні лімітується зволоженням клімату (омброрежимом) (рис. 3–4).

У 1961–1990 рр. за рівнем зволоження (рис. 4а) сприятливі умови для сосни представлені лише у Карпатах, задовільні умови – лише на заході, незначна площа на півночі, а на решті території умови малозадовільні та екстремальні. Нині відбулась аридизація клімату і зсув меж умов задовільності середовища для сосни відносно кліматичної норми на північний захід: сильно звужилася зона задовільних умов на заході, й поширилася зона непридатних умов на Дніпропетровщину, а також на південь і схід східного регіону.

Згідно з прогнозом за сценарієм *A1B* відбуватиметься звуження зони субоптимальних умов для сосни на заході та розширення зони непридатних умов на схід і до центру. Так, на кінець століття придатні для росту сосни умови (переважно екстремальні та малозадовільні) зберуться лише на заході, місцями на півночі.



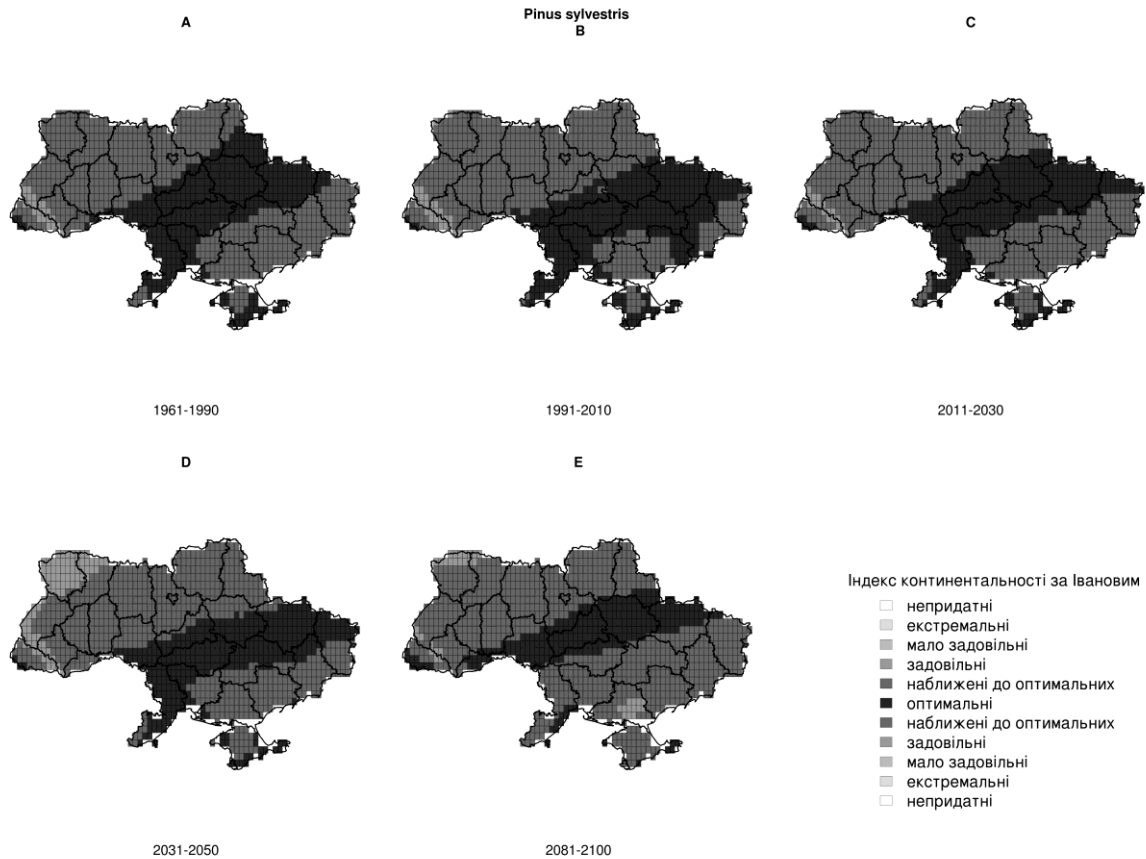
**a**



**б**

**Рис. 2 –** Хронологічна динаміка задовільності умов середовища за показниками *вологості клімату* (a) та *кріоклімату* (б) для дуба звичайного: А – кліматична норма (1961–1990 рр.); В – сучасний клімат (1991–2010 рр.); С - прогноз (за сценарієм A1B) на 2011–2030 рр.; D – прогноз на 2031–2050 рр.; Е – прогноз на 2081–2100 рр.

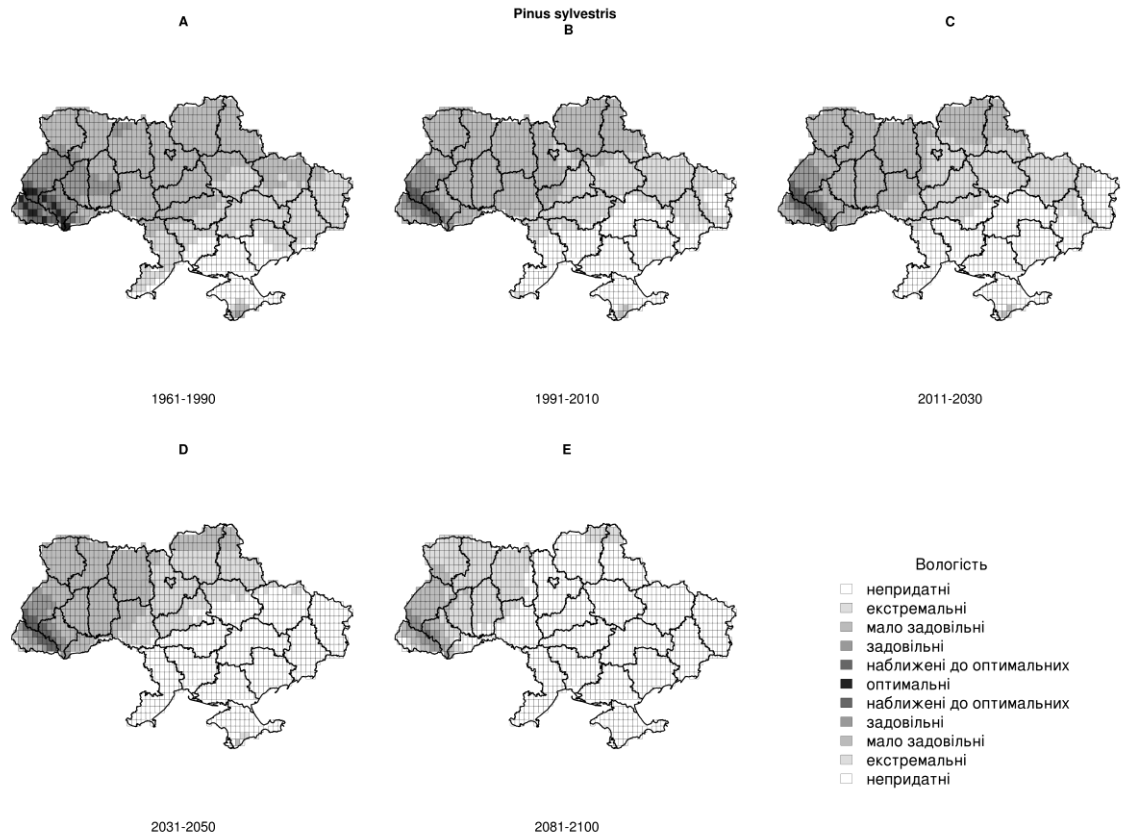




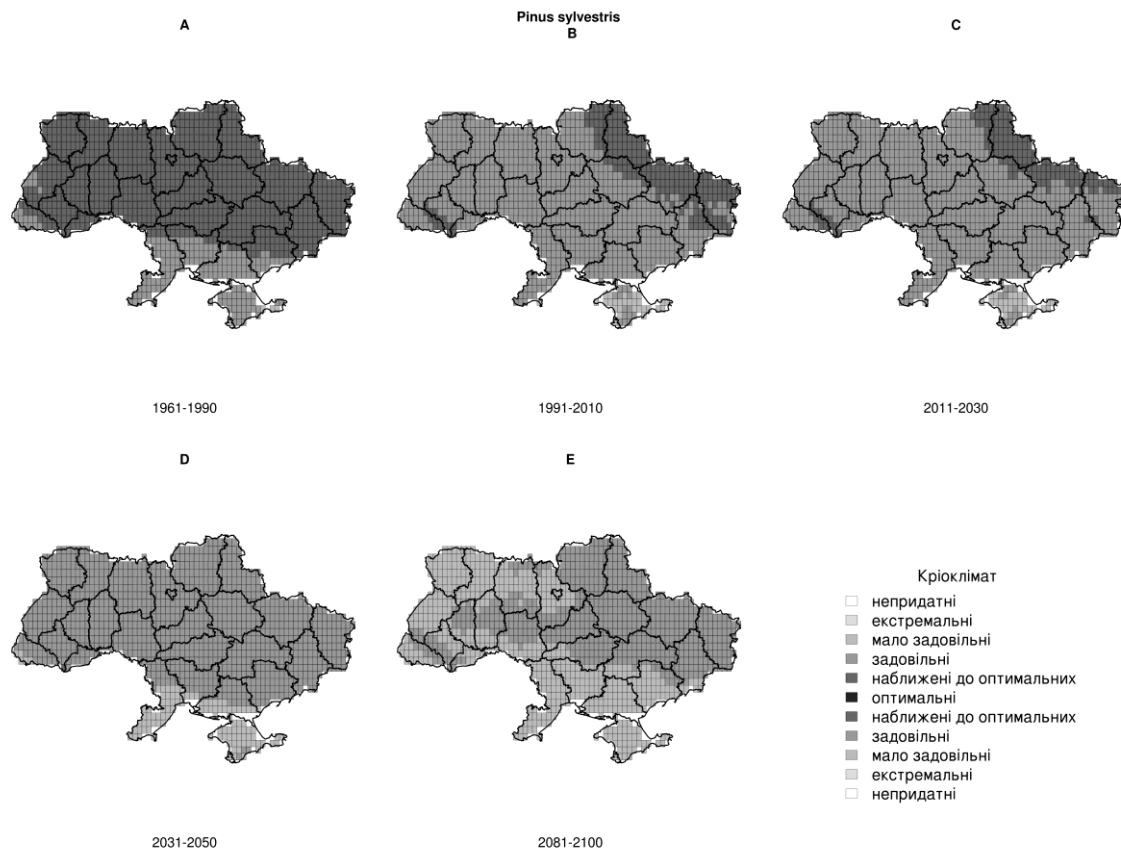
**Рис. 3 – Хронологічна динаміка задовільності умов середовища за показниками *континентальності клімату за Івановим* для сосни звичайної: А – 1961–1990 рр., В – сучасний клімат (1991–2010 рр.); С – прогноз (за сценарієм *A1B*) на 2011–2030 рр.; D – прогноз на 2031–2050 рр.; E – прогноз на 2081–2100 рр.)**

Це призведе до суттєвого погіршення стану соснових лісів в Україні, зменшення їхньої площі. Сосняки, ймовірно, зберуться лише в місцях з відносно вищим рівнем гумідності мікроклімату: в пониженнях борових терас, на схилах північної експозиції, вздовж річок та водойм, а також у місцях, де кореневі системи будуть забезпечені вологою протягом вегетаційного сезону.

Для обох досліджених основних лісоутворювальних деревних порід (дуба звичайного та сосни звичайної) найбільш критичним (лімітувальним) фактором є вологість клімату. Згідно з прогнозом відбуватиметься значне звуження зони оптимального росту за цим показником у період 2080–2100 рр. Через зміну клімату до кінця цього століття очікується поява доволі значних площ із несприятливими умовами для росту досліджених деревних порід і зміна зональних типів рослинності плакорів. Це пояснюється тим, що кліматичні режими екотопів із зональною рослинністю у разі автоморфного характеру живлення найбільше відповідають показникам, розрахованим за даними метеостанцій (Didukh 2012), які розташовані в стандартних умовах рельєфу і на площадках з викошуваним трав'яним покривом на сухих ґрунтах. Кліматичні ж режими долин, балок, заплав можуть значно відрізнятися від тих, які одержані в стандартних умовах метеостанцій. У місцях із несприятливими кліматичними умовами прогноуються істотне зменшення продуктивності досліджених деревних порід, поступова втрата репродуктивної здатності та можливості природного відновлення, порушення циклу сезонного розвитку і навіть онтогенезу, зменшення стійкості до шкідників і хвороб та збільшення загрози виникнення лісових пожеж. Серед досліджених деревних порід менші зміни площі очікуються для дуба звичайного, а дещо більші – для сосни звичайної.



**а**



**б**

**Рис. 4 – Хронологічна динаміка задовільності умов середовища за показниками вологості клімату (а) та кріоклімату (б) для сосни звичайної: А – 1961–1990 рр.; В – сучасний клімат (1991–2010 рр.); С – прогноз (за сценарієм А1В) на 2011–2030 рр.; D – прогноз на 2031–2050 рр.; Е – прогноз на 2081–2100 рр.**

Встановлено, що вплив зміни клімату на ліси України є різним залежно від географічного положення у межах країни, геоморфології та рельєфу (гори, рівнини), типів лісу й режиму ведення лісового господарства. Стан і динаміка лісових екосистем є результатом складної взаємодії факторів довкілля. Трендові зміни основних кліматичних показників у межах сучасних та очікуваних значень є менш небезпечними, ніж мінливість клімату, частота й суворість екстремальних ситуацій (теплові хвилі чи посухи) та ініційованих ними порушень (пожеж чи виникнення осередків шкідників). Найбільш уразливими виявилися лісові насадження степу та південного лісостепу, де є висока ймовірність збіднення, деградації й загибелі лісових екосистем на великих територіях. Разом із тим загроза збільшення вразливості лісів існує і в інших районах, особливо за умови реалізації жорсткіших сценаріїв зміни клімату.

Уразливість лісів може бути суттєво зменшена за рахунок розроблення та впровадження стратегій і системи дій, спрямованих на адаптацію рівнинних лісів України до зміни клімату. Адаптаційні стратегії мають ґрунтуватися на засадах сталого (невиснажливого) ведення лісового господарства.

**Висновки.** У другій половині ХХІ століття в Україні за сценарієм *A1B* очікується суттєве потепління та збільшення посушливості клімату у порівнянні із сучасним кліматом. Для оцінювання ефектів впливу зміни клімату розроблено методику прогнозування стану основних лісоутворювальних деревних порід за трьома кліматичними факторами: континентальністю, вологістю та кріокліматом за категоріями задовільності умов середовища, що дає можливість оцінювати життєздатність ценопопуляцій зазначених порід.

Встановлено, що для дуба звичайного та сосни звичайної найбільш критичним (лімітувальним) кліматичним фактором є вологість клімату. Згідно з прогнозом, у період 2080–2100 рр. відбуватиметься значне звуження зони оптимального росту за цим показником для згаданих порід. Через зміну клімату до кінця ХХІ століття очікується поява доволі значних площ із несприятливими умовами для росту досліджених деревних порід та зміна зональних типів рослинності плакорів. У місцях із несприятливими кліматичними умовами прогнозується істотне зменшення продуктивності лісоутворювальних порід, поступова втрата репродуктивної здатності та можливості природного відновлення, порушення циклу сезонного розвитку й навіть онтогенезу, зменшення стійкості до шкідників і хвороб та збільшення загрози виникнення лісових пожеж. Серед досліджених деревних порід менші зміни території, сприятливої для росту й розвитку лісів, відзначені для дуба звичайного, а більші – для сосни звичайної.

**Подяка.** Автори висловлюють подяку проекту Європейського Союзу ClimaEast та його національному координатору в Україні Владиславу Ігоровичу Жежеріну, професору Анатолію Зіновійовичу Швиденку з Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (IIASA) та кандидату фізико-математичних наук Світлані Володимирівні Краковській з Українського гідрометеорологічного інституту за підтримку під час проведення досліджень та підготування цієї публікації.

#### **REFERENCES – ПОСИЛАННЯ**

*Bondaruk, M. A. and Tselishchev, O. G.* 2015. Otsinka zadovil'nosti umov seredovishcha ekotopiv ta prognozne modelyuvannya stanu tsenopopulyatsiy vidiv raritetnoi lisovoi flori (na prikladi tyul'pana dibrovnogo) [The assessment of ecotopes' environment satisfactoriness and predictive modelling of conditions for coenopopulations of rare forest flora species (the case of *Tulipa quercetorum* Klock. Et Zoz.).] *Lisivnytstvo i ahrolisomelioratsiya* [Forestry and Forest Melioration], 126: 188–201 (in Ukrainian).

*Buksha, I.* 2010. Study of climate change impact on forest ecosystems, and development of adaptation strategies in forestry of Ukraine. *Climate Change Impacts on Forest Management in Eastern Europe and Central Asia: Dimensions, impacts, mitigation and adaptation policies. Forests and Climate Change Working Paper 8.* Ed. Csaba Matyas. FAO, p. 157–179.

*Buksha, I. F., Gozhik, P. F., Emelaynova, J. L., Trofimova, I. V., Shereshevskiy, A. I.* 1998. *Ukraina ta global'niy parnikoviy efekt. Kniga 2. Vrazlivist' i adaptatsiya ekologichnikh ta ekonomichnikh sistem do zmini klimatu* [Ukraine

and global green-house effect. Book 2. Vulnerability and adaptation of ecological and economic systems to climate changes.]. Kyiv, Publishing house of Agency on rational use of energy and ecology, 208 p. (in Ukrainian).

*Buksha, I. F., Pyvovar, T. S., Buksha, M. I.* 2014. Vulnerability assessment of eastern Ukrainian forests to climate change: case study on the base of GIS technology use. Scientific proceed. of Forestry Academy of Sciences of Ukraine, 12: 30–37.

*Buksha, I. F., Pyvovar, T. S., Buksha, M. I.* 2015. Ocynuyvannya urazlivosti lisostaniv pivnichno-skhidnoi Ukraini za riznikh scenariiv zmini klimatu v XXI storichchi [Evaluation of forest stands vulnerability at North-Eastern Ukraine under various climate change scenarios in the XXI century]. In: Lisivnichna nauka v konteksti stalogo rozvitku: Mat. nauk. konf. [Forestry science in the context of sustainable development: Proceeds of scientific conf.] (29–30 Sept. 2015). Kharkiv, URIFFM, p. 183–185. (in Ukrainian).

*Buksha, I. F., Shvidenko, A. Z., Bondaruk, M. A., Tselyshev, O. G., Pyvovar, T. S., Buksha, M. I., Pasternak, V. P., Krakovska, S. V.* 2017. Metodolohiya modelyuvannya ta otsynuyvannya vplyvu zminy klimatu na lisovi fitotsenozy Ukrayiny [The methodology of modelling of the impact of climate change on forest phytocenoses in Ukraine]. NUBIP. In press.

Conference on Climate Change in Paris 2015. [Electronic resource]. Available from: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/cop21/> (last accessed date 08.06.2017).

*Didukh, Ya. P.* 2011. The Ecological Scales for the Species of Ukrainian Flora and Their Use in Synphytoindication. Kyiv, Phytosociocentre, 176 p.

*Didukh, Ya. P.* 2012. Osnovy bioindikatsiyi [Fundamentals of bioindication]. Kyiv, Naukova Dumka, 344 p. (in Ukrainian).

*Didukh, Ya. P. and Plyuta, P. G.* 1994. Fitoindikatsia ekologichnikh factoriv [Phytoindication of environmental factors]. Kyiv, Naukova Dumka, 280 p. (in Ukrainian).

Earth Statement. 2015. [Electronic resource]. Available from: <https://globalchallenges.org/en/about/about-us> (last accessed date 08.06.2017).

*Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D., New, M.* 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. J. Geophys. Res (Atmospheres), 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201.

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, et al. (eds.)].

*Ivanov, N. N.* 1957. Mirovaya karta isparyaemosti [World map of evaporability]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 40 p. (in Russian).

*Ivanov, N. N.* 1959. Poyasa kontinentalnosti zemnogo shara [Belts of the continentality of the globe]. Izv. Vsesouznogo geograficheskogo obschestva, 91(5) 410–423 (in Russian).

*Karl, T. et al.* 2015. The recent surface warming hiatus: Fact or artifact of data biases. Science. Vol. 337.

*Konstantinov, A. R.* 1968. Isparenie v prirode [Evaporation in nature]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 532 p. (in Russian).

*Krakovska, S. V., Palamarchuk, L. V., Shedemenko, I. P., Dyukel, G. O., Gnatyuk, N. V.* 2011. Modeli zahal'noyi tsyrkulyatsiyi atmosfery ta okeaniv u prohnouzuvanni zmin rehional'noho klimatu Ukrayiny v XXI st. [Models of general circulation of the atmosphere and ocean at forecasting of changes in regional climate Ukraine in the XXI century.]. Geophysical journal, 33(6): 68–81 (in Ukrainian).

*La Querre, C. et al.* 2015. Global carbon budget 2014. Earth System Science Data, 7: 47–55.

Metody izucheniya i otsenki vodnogo balansu [Methods for studying and evaluating the water balance]. 1981. A. A. Sokolov (Ed.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 398 p. (in Russian).

Specialnij doklad MGEIK Scenarii vybrosov [Special report IPCC Scenarios of emission]. 2000. [Electronic resource]. Available from: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-ru.pdf> (last accessed date 07.06.2017) (in Russian).

*Stoyko, S. M.* 2009. Potentsiyi ekologichni naslidki global'nogo poteplinnya klimatu v lisovikh formatsiyakh Ukrain'skikh Karpat [The potential environmental impacts of global warming on forest formations of Ukrainian Carpathians]. Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny [Scientific Bulletin of UNFU], 19.15: 214–224 (in Ukrainian).

*Temperli, C., Bugmann, R., Elkin, C.* 2012. Adaptive management for competing forest goods and services under climate change. Ecological Applications, 22: 2065–2077.

*Tsyganov, D. N.* 1983. Fitoindikatsiya ekologicheskikh rezhimov v podzone khvoyno-shirokolistvennykh lesov [Phytoindication of ecological regimes in the subzone of coniferous-broadleaf forests]. Moscow, Nauka, 198 p. (in Russian).

Buksha I. F., Bondaruk M. A., Tselyshchev O. G., Pyvovar T. S., Buksha M. I., Pasternak V. P.

**VITALITY FORECASTING FOR SCOTS PINE AND ENGLISH OAK IN CONDITION OF CLIMATE CHANGE IN THE LOWLAND OF UKRAINE**

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

The method for predicting satisfactory of environmental conditions for tree species depending on three climatic factors (as continentality, humidity, and cryoclimate which effect on trees vitality) has been developed. By using of Q-GIS, the influence of climate changes (under IPCC scenario A1B) in the 21st century on the viability of coenopopulations of Scots pine (*Pinus silvestris* L.) and English oak (*Quercus robur* L.) was modeled on the basis of the model of tolerance amplitudes of the flora according to the indicated climatic factors. It was established that for the studied tree species the most critical (limiting) factor is the humidity of the climate. According to the forecast, a significant reduction in the zone of optimal growth in this indicator in 2080–2100 is expected and the appearance of significant areas with unfavorable conditions for the growth of the studied tree species (more for pine than for oak), which increases the likelihood of changes in zonal vegetation types of flat interfluves. In places with unfavorable climatic conditions, a significant decrease in the productivity of these forest-forming species is predicted, the gradual loss of their reproductive capacity and the possibility of natural regeneration, the violation of seasonal development cycles, the reduction of resistance to pests and diseases, and the increased risk of forest fires.

**Key words:** climate change, English oak, Scots pine, tolerance amplitude, satisfactory of environmental conditions, climatic factors.

Букша І. Ф., Бондарук М. А., Целищев А. Г., Пивовар Т. С., Букша М. І., Пастернак В. П.

**ПРОГНОЗ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТІ СОСНИ ОБЫКНОВЕННОЇ І ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА В РАВНИННОЙ ЧАСТИ УКРАИНЫ**

*Український науково-дослідницький інститут лісного господарства і агролісомеліорації ім. Г. Н. Высоцького*

Разработана методика и проведена оценка удовлетворительности условий среды для дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) в XXI веке по сценарию изменений климата МГЭИК A1B в зависимости от трех ведущих климатических факторов: континентальности, влажности и криоклимата. При помощи геоинформационной системы Q-GIS проведено моделирование влияния изменений климата на жизнеспособность ценопопуляций указанных пород на основании модели амплитуд толерантности флоры по упомянутым климатическим факторам. Установлено, что для исследованных древесных пород наиболее критическим (лимитирующим) фактором является влажность климата. Согласно прогнозу ожидается значительное сужение зоны оптимального роста по этому показателю в 2080–2100 гг. и появление значительных площадей с неблагоприятными условиями для роста исследованных древесных пород (в большей мере для сосны, чем для дуба), что повышает вероятность изменения зональных типов растительности плакоров. В местах с неблагоприятными климатическими условиями прогнозируется существенное снижение продуктивности этих лесообразующих пород, постепенная потеря ими репродуктивной способности и возможности природного возобновления, нарушение циклов сезонного развития, снижение устойчивости к вредителям и болезням, а также увеличение риска возникновения лесных пожаров.

**Ключевые слова:** изменение климата, дуб черешчатый, сосна обыкновенная, амплитуда толерантности, удовлетворительность условий среды, климатические факторы.

*E-mail: monitoring@uriffm.org.ua*

*Одержано редколегією: 12.06.2017*