

## Вступ

Серед природних систем суходолу планети ліси відіграють надзвичайно вагомі середовищеві функції. Вони полягають, зокрема, в депонуванні вуглецю з атмосфери, акумулюванні та використанні запасів води, збагаченні атмосфери вологою і киснем. Все це наслідки біологічної продуктивності лісових екосистем і, насамперед, їх автотрофних компонентів, тобто рослинних організмів [9, 28, 30, 42, 45, 56, 62, 63, 64, 66, 69, 70].

Загалом ліси вкривають 31% поверхні суходолу. Їхня площа орієнтовно становить 4 млрд гектарів. На одного мешканця Землі припадає 0,6 га лісу. Загальну біомасу лісів світу оцінюють у розмірі 600 млрд тонн сухої речовини, або 149 тонн на 1 га. У біомасі лісів світу міститься 289 млрд тонн вуглецю [30].

Європейські ліси також вагомо впливають на газовий склад атмосфери та на формування клімату. Загалом їхня площа становить 215 млн га. Загальний запас лісу в Європі оцінено в 35 млрд м<sup>3</sup>. Середня щільність запасів лісу в європейському регіоні становить 163 м<sup>3</sup>·га<sup>-1</sup>, що перевищує світовий середній показник (133 м<sup>3</sup>·га<sup>-1</sup>). Внаслідок фотосинтезу ліси поглинають із атмосфери велику кількість діоксиду вуглецю. У наш час щорічно в лісовій біомасі та ґрунті акумулюється 719 млн тонн вуглецю або приблизно 3,3 т·га<sup>-1</sup> [28, 61]. Така його кількість міститься в 6,7 т·га<sup>-1</sup> сухої фітомаси. Водночас це означає, що упродовж року ліси Європи споживають 2636 млн тонн діоксиду вуглецю, 1078 млн тонн води, 7939 терават-годин (ТВт·год) сонячної та теплової енергії, а також продукують в атмосферу 1917 млн тонн кисню. У перерахунку на один гектар це становить 12,1 т·га<sup>-1</sup> діоксиду вуглецю, 4,9 т·га<sup>-1</sup> води, 36,4 МВт·год·га<sup>-1</sup> (мегават-годин) енергії, 8,8 т·га<sup>-1</sup> кисню.

Продукційний процес фітомаси супроводжується інтенсивною транспірацією, що полягає у випаровуванні води з листової поверхні рослин. Вона забезпечує всмоктувальну функцію коріння, транспортування судинами розчину поживних речовин від коріння до листя, а також охолодження листової поверхні. Вважається, що для продукування

## Introduction

Among the natural systems of the land of the planet, forests have an extremely important environmentally creating functions. They are, in particular, in the deposition of carbon from atmosphere, the accumulation water reserves and its use, also the enrichment of atmosphere with moisture and oxygen. All this is the result of the biological productivity of forest ecosystems and, first of all, their autotrophic components, that is, the plant organisms [9, 28, 30, 42, 45, 56, 62, 63, 64, 66, 69, 70].

In general, forests cover 31% of the surface of the land. Their area is estimated at 4 billion hectares. For one inhabitant of the Earth there are 0.6 hectares of forest. The total biomass of the world's forests is estimated at 600 Gt of dry matter, or 149 tons per hectare. In general, the world forests biomass contains 289 Gt of carbon [30].

European forests also have a significant impact on the gas composition of atmosphere and on climate formation. In total, their area is 215 million hectares. The total growing stock of forests in Europe is estimated at 35 billion m<sup>3</sup>. The average density of growing stock in forests in the European region is 163 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>, which is larger than the world average (133 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>). As a result of photosynthesis, forests absorb a large amount of carbon dioxide from the atmosphere. At present, 719 million tons of carbon accumulates annually in forest biomass and soil, or approximately 3.3 t·ha<sup>-1</sup> [28, 61]. This amount is contained in 6.7 t·ha<sup>-1</sup> of dry phytomass. At the same time, it means that over the course of the year Europe's forests consume 2 636 million tons of carbon dioxide, 1 078 million tons of water, 7 939 terawatt-hours (TW·h) of solar and thermal energy, and produce in the atmosphere 1917 million tons of oxygen. In terms of one hectare, it is 12.1 t·ha<sup>-1</sup> of carbon dioxide, 4.9 t·ha<sup>-1</sup> of water, 36.4 MWh·ha<sup>-1</sup> (megawatt hour) of energy, 8.8 t·ha<sup>-1</sup> oxygen.

The production process of phytomass is accompanied by intense transpiration, consisting of the evaporation of water from the leaf surface of plants. It provides a suction function of the roots, the transport of solutions of nutrients from the roots to the leaves by vessels, and cooling of the leaf surface. It is believed that for the production of one

одного кілограма сухої речовини фітомаси для транспірації використовується від 200 до 1000 літрів води. Ця величина залежить від фізіологічних особливостей рослин, природно-кліматичних умов та застосованої агротехніки вирощування культур. Для рослин помірного клімату з характерним С3-фотосинтезом такий транспіраційний коефіцієнт може становити 450–900 літрів на 1 кг сухої речовини фітомаси [5, 33, 46].

Процес випаровування вимагає великої кількості енергії. Випаровування однієї тонни води споживає 637 кВт·год теплової енергії. Таким чином, щоб забезпечити середній приріст фітомаси лісів у Європі ( $6,7 \text{ t}\cdot\text{га}^{-1}$ ), випаровування споживає  $1900\text{--}3800 \text{ MWh}\cdot\text{га}^{-1}$ . У перерахунку це становить  $190\text{--}380 \text{ кВт}\cdot\text{год}\cdot\text{м}^{-2}$ . Упродовж року це може забезпечити середнє споживання теплової енергії потужністю  $22\text{--}44 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ . У середніх широтах Європи ( $30\text{--}60^\circ$ ) до поверхні суші в середньому надходить  $100\text{--}250 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$  сонячної енергії [32]. Отже, середній приріст фітомаси лісів у Європі споживає приблизно 22 % сонячної енергії.

Тому приріст фітомаси є вагомим регулятором регіонального клімату. Знищення лісів, знеліснення поверхні суходолу зменшує загальний приріст фітомаси і, відповідно, використання енергії на фотосинтез та транспірацію. Це призводить до підвищення температури приземних шарів атмосфери. І навпаки, збільшення приросту фітомаси збільшує використання теплової енергії та значною мірою охолоджує й додатково зволожує повітря. Саме тому одним із радикальних шляхів запобігання потеплінню та зменшенню вологості клімату на суходолі повинно бути розширення площ лісів та підвищення їх продуктивності [40]. Практичне здійснення таких проектів потребує відповідного теоретичного обґрунтування. Основою його повинні бути узагальнені фактичні біометричні дані про ріст деревостанів у різних природно-кліматичних та ґрунтово-гідрологічних умовах. Особливо це стосується мішаних різновікових деревостанів. Їх моделювання вимагає застосування знань про хід росту складових дерев різних видів.

Ця проблема є особливо актуальною для України. Тутешні ліси та інша деревна

kilogram of dry matter, phytomasses for transpiration are used from 200 to 1000 liters of water. This value depends on the physiological characteristics of the plants, the natural and climatic conditions and the applied crop cultivation farming techniques. For the plants of moderate climate with characteristic C3-photosynthesis, such transpiration coefficient can be 450–900 liters per 1 kg of dry matter phytomass [5, 33, 46].

The evaporation process requires large amounts of energy. Evaporation of one ton of water requires 637 kWh of heat energy. Thus, to ensure the average increment of phytomass in Europe ( $6.7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), the evaporation uses  $1900\text{--}3800 \text{ MWh}\cdot\text{ha}^{-1}$ . In recount it is  $190\text{--}380 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ . In the course of the year it can provide the average consumption of heat energy with the capacity of  $22\text{--}44 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  by power. In the middle latitudes of Europe ( $30\text{--}60^\circ$ ) an average of  $100\text{--}250 \text{ t}\cdot\text{m}^{-2}$  of solar energy enters to the surface of the land [32]. Consequently, the average increment of phytomass in Europe consumes about 22 % of the incoming solar energy.

That is why, the increment of biomass is an important regulator of the regional climate. The destruction of forests, the deforestation of the surface of the land reduces the growth of phytomass and, consequently, decreases the use of energy for photosynthesis and transpiration. It leads to the increment in the temperature of the surface layers of the atmosphere. Conversely, the increment of phytomass uses thermal energy, significantly cools and further moistens the air. That is why one of the radical ways to prevent warming and to reduce the humidity of the climate on the land should be the expanding the forests area and increasing of their productivity [40]. The practical implementation of such projects requires appropriate theoretical substantiation. The basis of it should be generalized actual biometric data on the growth of forest stands in different natural climatic and soil-hydrological conditions. This is especially true for mixed uneven-aged forest stands. Their modeling requires the application of knowledge about the course of growth of tree components of different species.

This problem is especially relevant for Ukraine. Local forests and other woody

рослинність займають заледве 15,9 % від загальної площі (майже 9,6 млн га) [26]. Їх середній запас становить  $218 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [28, 26, 37]. Це доволі високий показник, оскільки він значно більший, ніж актуальний для Європи загалом, проте трохи менший, ніж властивий для центрально-східного регіону Європи [28]. За попередніми оцінками, загальний обсяг фітомаси лісів України на 2009 рік становив 1317,9 млн тонн. Він містив 658,9 млн тонн вуглецю [62, 39, 41]. Середній поточний приріст об'єму деревини в лісах України тепер сягає  $3,9 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$  [26], тобто майже 1,7 %. У Європі загалом цей показник нижчий, всього 1,29 %. Відповідно, можна вважати, що річний приріст біомаси в лісах України сягає  $2,7 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$ , в тому числі депонованого вуглецю –  $1,35 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$ . Ці показники значно нижчі, ніж наведені для Європи загалом. Упродовж року українські ліси можуть забезпечити середнє споживання теплової енергії потужністю лише 9–18  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ . Зважаючи на екологічні пріоритети, щоб досягнути європейського рівня, необхідно підвищити продуктивність лісів щонайменше вдвічі.

Традиційно склалося бачення, що найвищі значення річного приросту стовбурної деревини властиві молодим та середньовіковим деревостанам. Подібною є також думка, що у старшому віці деревостанів приріст деревини зменшується [47, 58]. Саме тому з біологічної та економічної точки зору встановлено доцільним вік стиглості деревостанів 80–100 років. Таке бачення потребує ретельної перевірки і додаткового дослідження, оскільки продуктивність лісів старшого віку в офіційних джерелах майже не представлена [28, 58, 67]. Особливо це стосується мішаних різновікових деревостанів природного походження.

В Україні таких деревостанів у віці стиглості та старшого віку залишилось зовсім не багато (приблизно 7 %). Переважно вони є розрідженими, а запас стовбурної деревини їх невеликий,  $250\text{--}500 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [37]. Це результат інтенсивної господарської діяльності, періодичних рубань деревостанів. Тому, відповідно, невеликим є поточний приріст біомаси лісів в Україні. Адже їх запаси можуть сягати понад  $800 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ , а поточний

vegetation occupy only 15,9 % of the total area (almost 9,6 million hectares) [26]. Their average stock is  $218 \text{ м}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  [28, 26, 37]. This is relatively high rate, because it is much more than actual for Europe as a whole, but slightly less than typical for the Central-Eastern Region of Europe [28]. According to preliminary estimates, in 2009 the total amount of phytomass of forests of Ukraine amounted to 1 317.9 million tons. It contained 658.9 million tons of carbon [62, 39, 41]. The average annual Increment in timber volume in Ukraine's forests now reaches  $3.9 \text{ м}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  [26], which is almost 1.7 %. In Europe, this indicator is generally lower, only 1.29 %. Accordingly, it can be assumed that the annual growth of biomass in the forests of Ukraine reaches  $2.7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , in that deposited carbon –  $1.35 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ . These indices are much lower than those for Europe as a whole. In the course of the year, Ukrainian forests can provide an average thermal energy consumption of only 9–18  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  by power. Comparing the environmental priorities with European level, it is necessary to increase the productivity of forests at least twice.

Traditionally, a vision has emerged, that the highest values of the annual growth of stem wood are characteristic of young and middle age forest stands. Similar is the opinion that in older age of the forest stands the growth of the wood decreases [47, 58]. That's why from the biological and economical point of view the age of forest stands ripeness is defined as 80–100 years. Such vision needs careful verification and additional research, as the productivity of the forests of older age in official sources is almost not represented [28, 58, 67]. This is especially true for natural mixed uneven-aged forest stands.

In Ukraine, the area of such forests in the age of mature and older age remained a small amount (about 7 %). They are mainly rarefied and their stem volume of stands is low,  $250\text{--}500 \text{ м}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  [37]. This is the result of intensive economic activity, periodic felling of stands. According to this fact, is a small current increment of forests biomass in Ukraine. However, their stands volume can reach over  $800 \text{ м}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , and annual increment



приріст біомаси – більше  $10 \text{ t} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$  [22, 66]. Для прикладу, деревостани віком понад 100 років мають середні запаси більше  $800 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  у Бельгії, Франції, Німеччині, Угорщині, Латвії, Нідерландах, Словенії [28].

Такі деревостани потрібно всебічно дослідити і розробити моделі їх росту. Насамперед, це стосується біометричних показників ходу росту та продуктивності. Прикладом можуть слугувати нові таблиці ходу росту та продуктивності деревостанів Північної Євразії [42], які охоплюють 200- і навіть 300-річний період їх росту.

Особливо актуальними є ці питання для різновікових деревостанів, що сформувалися шляхом природного відновлення. Адже у нормативних таблицях такі матеріали зовсім не представлені [22, 47, 58, 59]. Різновікові деревостани складаються з множини дерев різних видів, віку та розмірів. Їхні біометричні показники дуже різняться. Усереднення їх (середнє арифметичне зважене) не дає коректних результатів.

Щоб подолати цю проблему, слід застосувати узагальнення біометричних показників кожного окремого дерева, що легко здійснити за допомогою сучасних комп'ютерних методів. Це особливо стосується дерев віком понад 100 років. Отже, необхідні усереднені табличні дані щодо віку, діаметру, висоти, об'ємів стовбурів дерев та приросту цих показників.

На цій основі можна розробити математичні поліноми ходу росту та приросту біометричних параметрів дерев різного віку, що росли в різних типах природно-географічних та ґрунтово-гідрологічних умов.

Подекуди в лісах Карпат ще трапляються і велетенські дерева, вік яких сягає понад 200 років. Вони потребують не лише збереження, а й також дослідження біометричних особливостей їх росту. Адже така біометрична інформація здебільшого відсутня [4, 27, 43, 44, 48, 50, 51]. На жаль, біометрична інформація щодо таких дерев, які росли і ростуть у Карпатському регіоні, відсутня і в нормативних матеріалах. Досить мало і наукових публікацій з цих питань [1, 2, 11, 12, 14, 20, 21, 23, 34, 35, 36, 55, 58, 66].

Саме такі фактичні нормативні матеріали щодо росту старовікових дерев вкрай необ-

of biomass – more than  $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  [22, 66]. For example, stands over 100 years old have average volume of over  $800 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  in Belgium, France, Germany, Hungary, Latvia, Netherlands, Slovenia [28].

Such forest stands need to be thoroughly explored and must be developed the models of their growth. First of all, it concerns biometric indicators of growth course and productivity. An example is the new tables of the growth and productivity of the Northern Eurasian forests [42], which cover the 200 and even 300 years of their growth.

Particularly relevant are these issues for uneven-aged forest stand, that were formed by natural regeneration. Indeed, in the normative tables, such data are not presented at all [22, 47, 58, 59]. Multi-aged forest stands consist of a plurality of the trees of different species, of different age and size. Their biometric parameters vary greatly. Averaging them do not give the correct results (arithmetic average weighted).

To overcome this problem, it is necessary to apply a generalization of the biometric indexes of each individual tree, which is easy to implement with the modern computer methods. This is especially true for trees over 100 years old. Therefore, averaged tabular data concerning for age, diameter, height, tree trunk volume and increment of these indices are required.

On this basis, mathematical polynomials of the growth and increment of biometric parameters of the trees of different age, that in sundry types of natural geographic and soil-hydrological conditions growing, can be developed.

Somewhere in the Carpathian forests there are gigantic trees, whose age is over 200 years old. They require not only the preservation but also the study of biometric characteristics of their growth. After all, such biometric information is mostly absent [4, 27, 43, 44, 48, 50, 51]. Unfortunately, the biometric information for such trees that grew and grow in the Carpathian region is unrepresented and in normative materials. There are also a few scientific publications on these issues [1, 2, 11, 12, 14, 20, 21, 23, 34, 35, 36, 55, 58, 66].

It is these factual normative materials on the growth of old-age trees that are very

хідні для розв'язання важливої проблеми динаміки розвитку різновікових мішаних деревостанів, що утворені деревами декількох едифікаторних видів. А вже ще у 1942 році відомий учений-лісівник Галичини Андрій Пясецький влучно прогнозував, що у порівнянні такі динамічні біометричні характеристики ходу росту дерев, які ростуть у різних умовах, можуть дати відповідь на питання про особливості "перебігу розв'язаної динаміки" таких деревостанів, а також здатність їх до самовідтворення [52]. На жаль, у науковій літературі майже відсутні такі відомості стосовно лісів західного регіону України [60, 57].

Саме тому метою нашого дослідження було пізнання закономірностей ходу росту за базовими біометричними показниками дерев, що ростуть у лісах Карпат у межах басейну ріки Дністер. Особливу увагу при цьому надавали старовіковим деревам, які ростуть у типових ґрунтово-кліматичних умовах, якими є свіжі та вологі ґрунти середньої родючості на Передкарпатській височині та в горах Бескидах і Горганах.

У цій монографії пропонуємо оригінальні результати досліджень ходу росту та приросту 219 модельних дерев різних видів, особливо старшого віку.

Сподіваємося, що наша праця буде корисною для застосування у моніторингових наукових дослідженнях лісів у національних парках та природних заповідниках. Також представлені у цій праці матеріали можуть бути використані для практичного лісівництва. Зокрема, це стосується вироблення засад вирощування наближених до природних багатовидових різновікових деревостанів. Запропоновані біометричні узагальнення можуть бути застосовані для визначення орієнтовного віку велетенських дерев та розроблення методичних засад біометричних досліджень мішаних різновікових деревостанів й побудови відповідних нормативних таблиць.

### Подяки

Наші дослідження були виконані упродовж 2004–2015 років за участю студентів, викладачів і працівників Прикарпатського лісгосподарського коледжу (м. Болехів, Івано-Франківська область, Україна). Особ-

essential for solving an important problem of the dynamics of development of uneven-aged mixed stands, which are formed by trees of several edificatory species. Yet, in 1942 the well-known Galician Forestry scientist, Andriy Pyasetskyj, accurately predicted that in comparison, such dynamic biometric characteristics of the growth of trees, that grow in different conditions, can give an answer to the question of the peculiarities of the "course of development dynamics" of such stands, and as well as their ability to self-regenerations [52]. Unfortunately, in the scientific literature there is practically no information concerning forests of the western region of Ukraine [60, 57].

That is why the purpose of this study was to know the regularities of growth according to the basic biometric indices of the trees growing in the Carpathian forests within the basin of the Dniester River. Particular attention was paid to the old-age trees, which grow in typical soil-climatic conditions, which are fresh and wet soils of middle fertility on the Carpathian Foothills and in Beskydy mountains and also Gorgany range.

In this monograph we offer the original results of research about the course of growth and increment of 219 model trees of different species especially of older age.

We hope that our work will be useful for use in the monitoring scientific research of forests in national parks and nature reserves. Also, the materials presented in this paper can be used for practical Forestry. In particular, this concerns the elaboration of the principles of growing close to natural multi-species uneven-aged forest stands. The proposed biometric generalizations can be used to determine the estimated age of giant trees and to develop the methodological principles of biometric studies of mixed all-age forest stands and the creation of appropriate normative tables.

### Thanks

Our research was executed out during 2004–2015 with the participation of students, teachers and employees of the Precarpathian Forestry College (Bolechiv, Ivano-Frankivsk region, Ukraine). Particularly important was

ливо важливою була участь у зборі та первинній обробці матеріалів викладача Андрія Савчина. Він організовував і керував студентськими експедиціями. Також разом зі студентами формував колекцію модельних дерев, здійснював біометричні вимірювання.

Всебічно сприяли проведенню цих досліджень працівники місцевих лісогосподарських підприємств.

У проведенні досліджень, опрацюванні матеріалів та підготовці рукопису авторам надавали допомогу фахівці Національного лісотехнічного університету України (м. Львів) та Державного природознавчого музею Національної академії наук України (м. Львів).

Також доктор Станіслав Кухажик, заступник директора Бещадського національного парку (Польща), та філолог Андрій Стасів, викладач англійської мови Прикарпатського лісогосподарського коледжу, надали нам фахову допомогу. Значну підтримку надав академік НАН України Дмитро Гродзінський, який представив наші узагальнення до публікації в журналі "Доповіді Національної академії наук України".

Автори монографії висловлюють щирю подяку всім колегам за надану допомогу.

Видання профінансовано з Івано-Франківського обласного фонду охорони навколишнього природного середовища.

the participation in the collection and initial processing of the materials of teacher Andriy Savchyn. He organized and directed student expeditions. Also, together with students, he formed a collection of model trees, carried out biometric measurements.

Employees of the local Forestry Enterprises thoroughly contributed to this research.

Scientific specialists of the National Forestry University of Ukraine (Lviv) and the State Natural History Museum of the National Academy of Sciences of Ukraine (Lviv), helped the authors during the research processing and preparation of the manuscript.

Also, Dr. Stanisław Kucharzyk, deputy director of the Bieszczady National Park (Poland), and the philologist Andriy Stasiv, the teacher of English language at the Precarpathian Forestry College, provided us with a professional assistance. Considerable support was rendered by the Academician of NAN of Ukraine Dmytro Grodzinskiy, who presented our generalizations to the publication in a magazine "Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine".

The authors of this monograph express sincere gratitude to all Colleagues for their help.

The publication is funded from Ivano-Frankivsk Oblast Environmental Protection Fund.