

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет магістерської підготовки
Кафедра агрометеорології та
агроекології

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **Агроекологічна оцінка впливу змін клімату на умови**
виращування та продуктивність енергоплантацій тополі в
Лісостепу

Виконала студентка 2 курсу групи МАЕ-19 з/ф
Спеціальність 101 «Екологія»,
(шифр і назва)

Освітня програма «Агроекологія»
(назва)

Скуртул Катерина Володимирівна
(прізвище, ім'я, по батькові студента)

Керівник к.геогр.н., доцент
Вольвач Оксана Василівна
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультант -
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Рецензент к.геогр.н., доцент
Волошина Олена Вікторівна
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Одеса 2020 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської підготовки
Кафедра агрометеорології та агроекології
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 101 «Екологія»
(шифр і назва)
Освітня програма Агроекологія
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
агрометеорології та агроекології
Польовий А.М.
« 26 » жовтня 2020 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Скуртул Катерині Володимирівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи: Агроекологічна оцінка впливу змін клімату на умови вирощування та продуктивність енергоплантацій тополі в Лісостепу
керівник роботи Вольвач Оксана Василівна, к.геогр.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом закладу вищої освіти від « 16 » жовтня 2020 року № 194 «С»
- Строк подання студентом роботи 07 грудня 2020 року
- Вихідні дані до роботи: 1. Метеорологічні дані за сценаріями RCP4.5, RCP6.0 та RCP8.5 зміни клімату за період 2021-2050 рр. (середньодаданні температури повітря, декаданні суми опадів, середньодаданний дефіцит вологості повітря, відносна вологість повітря, інтенсивність сонячної радіації) по Вінницькій області. 2. Середньобагаторічні метеорологічні дані по Вінницькій області.
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Вивчити фізико-географічні та агрокліматичні особливості території Лісостепу (на прикладі Вінницької області); ознайомитись з методологією динамічного моделювання продукційного процесу; вивчити біологічні особливості тополі енергетичної; оцінити зміни агрокліматичних умов вирощування тополі в Вінницькій області у зв'язку зі зміною клімату; визначити вплив змін клімату на фотосинтетичну продуктивність та урожайність тополі за умов реалізації сценаріїв RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Графіки динаміки сценарних (за сценаріями RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5) середньодекадних температур і сум опадів за декаду у порівнянні з базовими; графіки накопичення площі листя плантацій енергетичної тополі за сценарними і базовим варіантами; графіки сценарних приростів потенційної урожайності в залежності від ФАР у порівнянні з базовими.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	немає		

7. Дата видачі завдання 26 жовтня 2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Отримання завдання. Формування бази даних для виконання магістерської роботи. Оформлення текстової частини першого та другого розділів магістерської роботи.	26.10.2020 р. - 05.11.2020 р.	95	5 (відмінно)
2	Розрахунки агрокліматичних показників вегетаційного періоду тополі енергетичної.	06.11.2020 р. - 10.11.2019 р.	95	5 (відмінно)
3	Розрахунки урожаїв тополі різних агроекологічних категорій за умов реалізації сценарію RCP4.5 у порівнянні з базовими.	11.11.2020 р. - 15.11.2019 р.	95	5 (відмінно)
	Рубіжна атестація	16.11.2020 р. - 21.11.2020 р.	95	5 (відмінно)
4	Розрахунки урожаїв тополі різних агроекологічних категорій за умов реалізації сценаріїв RCP6.0 та RCP8.5 у порівнянні з базовими.	22.11.2020 р. - 29.11.2020 р.	95	5 (відмінно)
5	Узагальнення отриманих результатів. Оформлення остаточної електронної версії роботи та передача її на процедуру встановлення ступеня оригінальності, відсутності ознак плагіату та складення протоколу і висновку керівника.	30.11.2020 р. - 07.12.2020 р.	95	5 (відмінно)
	Підготовка презентаційного матеріалу до публічного захисту.			
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		95,0	

Студентка

(підпис)

Скуртул К.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Вольвач О.В.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Скуртул К.В. Агроекологічна оцінка впливу змін клімату на умови вирощування та продуктивність енергоплантацій тополі в Лісостепу

Актуальність обраної теми зумовлена тим, що розвиток біоенергетики сприятиме посиленню енергонезалежності України у сучасних складних економічних умовах. Україна має виключні агрокліматичні та ґрунтові ресурси для отримання сталих і високих урожаїв біоенергетичних культур, зокрема, тополі. Тому необхідне детальне вивчення агрокліматичних умов її вирощування на досліджуваній території з метою раціонального використання цих умов і найбільш оптимального розміщення посадок. Особливого значення набуває вирішення цього питання у зв'язку зі змінами клімату.

Метою даного дослідження є оцінка впливу змін клімату на агрокліматичні ресурси стосовно умов формування продуктивності тополі на прикладі однієї з лісостепових областей України – Вінницької.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні *завдання*:

- розрахувати основні агрокліматичні показники вегетаційного періоду тополі третього року життя в Вінницькій області за базовими умовами та врахуванням змін клімату за сценаріями RCP4.5, RCP6.0 та RCP8.5;
- визначити вплив можливих змін клімату на фотосинтетичну продуктивність та урожайність тополі за умов реалізації сценаріїв зміни клімату RCP4.5, RCP 6.0 та RCP8.5;
- провести оцінку продуктивності агрокліматичних ресурсів для тополі.

Об'єкт дослідження - енергопосадки топлі в Лісостепу.

Предмет дослідження - вплив можливих змін клімату на агрокліматичні умови вирощування і продуктивність енергопосадок в Вінницькій області.

Метод дослідження - метод математичного моделювання продукційного процесу рослин.

Вперше: встановлені закономірності впливу змін клімату на агрокліматичні умови вирощування тополі та продуктивність культури в Вінницькій області.

Отримані результати можуть бути використані при виконанні комплексної оцінки агрокліматичних ресурсів стосовно вирощування тополі та оптимізації розміщення її посівних площ за умов реалізації сценаріїв RCP4.5, RCP6.0 та RCP8.5 зміни клімату в лісостепу.

Робота складається із вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань. Повний обсяг роботи становить 70 сторінок, 9 рисунків, 10 таблиць. Список використаних літературних джерел містить 29 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: тополя, модель продуктивності, зміна клімату, агрокліматичні умови, урожай біомаси.

SUMMARY

Skurtul K.V. Agroecological assessment of the impact of climate change on growing conditions and productivity of poplar energy plantations in the Forest-Steppe

The relevance of the chosen topic is due to the fact that the development of bioenergy will contribute to the strengthening of Ukraine's energy independence in today's difficult economic conditions. Ukraine has exceptional agro-climatic and soil resources for sustainable and high yields of bioenergy crops, in particular, poplar. Therefore, it is necessary to study in detail the agro-climatic conditions of its cultivation in the study area for the purpose of rational use of these conditions and the most optimal placement of crops. Addressing this issue in relation to climate change is of particular importance.

The aim of this study is to assess the impact of climate change on agro-climatic resources relative to the conditions of formation of productivity of poplar on the example of one of the Forest-Steppe regions of Ukraine – Vinnitsa region.

To achieve this goal it is necessary to solve the following tasks:

- calculate the main agro-climatic indicators of the growing season of poplar of the third year of life in the Vinnitsa region for the basic conditions and taking into consideration climate change scenarios RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5;
- to determine the impact of possible climate change on photosynthetic productivity and productivity of poplar, provided the implementation of climate change scenarios RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5;
- to assess the productivity of agro-climatic resources for poplar.

The object of the study is the energy plantations of willow in the Forest-Steppe.

The subject of the study is the influence of possible climate changes on agro-climatic conditions of cultivation and productivity of energy plantations in Vinnitsa region.

The research method is a method of mathematical modeling of the production process of plants.

For the first time: regularities of influence of climate changes on agro-climatic conditions of cultivation of poplar and productivity of culture in Vinnitsa region are established.

The results obtained can be used in the implementation of a comprehensive assessment of agro-climatic resources in relation to the cultivation of poplar and optimization of acreage in the conditions of implementation of scenarios RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5 climate change in the forest-steppe.

The work consists of an introduction, 4 sections, conclusions, a list of references. The full volume of the work is 70 pages, 9 figures, 10 tables. The list of references contains 29 titles.

KEY WORDS: poplar, productivity model, climate change, agro-climatic conditions, yield biomass.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНІ ТА АГРОКЛІМАТИЧНІ УМОВИ ВІННИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ	9
1.1 Фізико-географічна характеристика та особливості геологічної будови	9
1.2 Кліматичні умови.....	12
2 НАРОДНО-ГОСПОДАРСЬКЕ ЗНАЧЕННЯ ТА АГРОЕКОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТОПОЛІ	14
2.1 Народно-господарське значення тополі.....	14
2.2 Ботанічна та агроєкологічна характеристика тополі (<i>Populus</i>).....	18
2.3 Поточний стан розвитку біоенергетики в Україні.....	24
3 ВПЛИВ ЗМІН КЛІМАТУ НА АГРОКЛІМАТИЧНІ УМОВИ ВИРОЩУВАННЯ ЕНЕРГОПЛАНТАЦІЙ ТОПОЛІ	27
3.1 Сучасні відомості щодо змін клімату.....	27
3.2 Базова модель оцінки агрокліматичних ресурсів А.М. Польового.....	30
3.2.1 Блок вхідної інформації.....	31
3.2.2 Блок показників сонячної радіації і волого-температурного режиму..	31
3.2.3 Блок функцій впливу фази розвитку і метеорологічних факторів на продукційний процес рослин	33
3.2.4 Блок родючості ґрунту і забезпеченості рослин мінеральним живленням.....	36
3.2.5 Блок агроєкологічних категорій урожайності	38
3.2.6 Блок узагальнених оціночних характеристик	40
3.3 Агрокліматичні показники вегетаційного періоду за умов реалізації сценарію RCP4.5	42
3.4 Агрокліматичні показники вегетаційного періоду за умов реалізації сценарію RCP6.0	46
3.5 Агрокліматичні показники вегетаційного періоду за умов реалізації сценарію RCP8.5	49
4 ВПЛИВ ЗМІН КЛІМАТУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ЕНЕРГОПЛАНТАЦІЙ ТОПОЛІ	53
4.1 Вплив змін клімату за сценарієм RCP4.5 на формування урожаїв тополі різних агроєкологічних категорій.....	53
4.2 Вплив змін клімату за сценарієм RCP6.0 на формування урожаїв тополі різних агроєкологічних категорій	57
4.3 Вплив змін клімату за сценарієм RCP8.5 на формування урожаїв тополі різних агроєкологічних категорій	61
4.4 Оцінка продуктивності агрокліматичних ресурсів території Лісостепу для вирощування енергоплантацій тополі	65
4.5 Агроєкологічні категорії урожайності.....	68
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	73

ВСТУП

Протягом останніх десятиліть змінюється світова енергетична політика. Якщо раніше безперечна перевага надавалася викопному паливу, то тепер з'явилася тенденція до вирівнювання можливостей розвитку всіх видів виробництва енергії і джерел постачання палива. На сьогоднішній день багато європейських країн мають потребу в альтернативних джерелах енергії, щоб зменшити споживання невідновлюваних видів палива і покладатися в основному на поновлювані джерела енергії.

Наша держава також підтримує цей шлях енергетичного розвитку. Стратегічні орієнтири розвитку паливно-енергетичного комплексу України прописані в Енергетичній стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”, схваленій розпорядженням Кабінету Міністрів № 605-р від 18 серпня 2017 р. [1]. Також цим керівним документом віддається перевага підвищенню енергоефективності й використанню енергії із відновлюваних та альтернативних джерел. Одним з пріоритетних напрямків розвитку енергетики нашої країни проголошено впровадження заходів її адаптації до зміни клімату.

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) - це ресурси, що утворюються на основі природних процесів (існуючих постійно або виникаючих періодично), а також протягом життєвих циклів рослинного чи тваринного світу та життєдіяльності людського суспільства. В назві цих ресурсів відображені джерела їх виникнення (енергія сонячна, вітрова, хвильова, приливна і ін.) або вид енергоносія (біомаса та ін.) [2]. Практичне використання відновлюваних джерел енергії отримало сьогодні інтенсивний розвиток в багатьох країнах світу.

Енергетичні культури – це рослини, які спеціально вирощуються для використання безпосередньо в якості палива або для виробництва біопалива. Популярність енергетичних культур в значній мірі обумовлюється тим, що

вони надзвичайно швидко ростуть. Після посадки, їх можна збирати вже через 1-3 роки, а після збору врожаю вони повторно вступають в період вегетації дуже швидко - таким чином будучи безперервним поновлюваним джерелом енергії.

До енергетичних культур європейської кліматичної зони відносяться: однорічні рослини з високим вмістом цукру і крохмалю (цукровий буряк, кукурудза на зерно), які використовуються для виробництва біоетанолу; олійні (рапс, соняшник), з яких виготовляють біодизель; багаторічні трави, серед яких поширені - міскантус гігантський, топінамбур і деякі види трав. Популярними енергетичними культурами в Європі є тополя і верба, які використовуються для виробництва теплової та електричної енергії, виробництва твердих біопалив або отримання рідких біопалив 2-го покоління [3].

Представники роду тополь серед деревних рослин є найбільш швидкоростучими. Деревя тополі висаджують для формування полезахисних лісосмуг, а також для очищення забрудненого повітря в містах.

Незважаючи на наявність великої кількості напрацювань стосовно вирощування енергетичної тополі, на сьогоднішній день матеріали щодо впливу змін клімату на перспективи вирощування і продуктивність цієї культури в літературі практично відсутні. Тому тема кваліфікаційної магістерської роботи є досить актуальною.

Задачами роботи є:

1. Вивчити ботанічні та біологічні особливості тополі енергетичної, вимоги культури до умов навколишнього середовища.

2. Ознайомитись з існуючими сценаріями зміни клімату для України на прикладі репрезентативних траєкторій концентрацій (Representative Concentration Pathways - RCP).

3. Вивчити алгоритм базової моделі оцінки агрокліматичних ресурсів. А.М. Польового та адаптувати параметри моделі стосовно тополі.

4. Проаналізувати вплив можливих змін клімату на агрокліматичні умови вегетаційного періоду енергетичної тополі.

5. Проаналізувати вплив можливих змін клімату на показники фотосинтетичної продуктивності трьохрічних плантацій тополі у Лісостепу (на прикладі Вінницької області), а також на врожайність деревини культури.

Для виконання розрахунків використовувались метеорологічні дані за сценаріями зміни клімату RCP4.5, ECP6.0 та RCP8.5 та відповідні середньобаторічні метеорологічні дані по Вінницькій області.

1 ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНІ ТА АГРОКЛІМАТИЧНІ УМОВИ ВІННИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ

Вінницька область – одна з областей зони Лісостепу України. Лісостепова зона простягається смугою понад 1 тис. км від Карпат до східних кордонів України. Загальна площа її становить понад 20,1 млн. га, або 33,6% території держави. Порівняно м'яка зима, помірно вологе й тепле літо та родючі ґрунти створюють найсприятливіші в Україні умови для одержання високих і сталих урожаїв майже всіх тепло- і вологолюбних культур.

1.1 Фізико-географічна характеристика та особливості геологічної будови

Вінницька область утворена 27 лютого 1932 року. Обласний центр - місто Вінниця. Розташована на правобережжі Дніпра в межах Придніпровської та Подільської височин. На заході межує з Чернівецькою та Хмельницькою, на півночі з Житомирською, на сході з Київською, Кіровоградською та Черкаською, на півдні з Одеською областями України та з Республікою Молдова, в тому числі частина кордону приходить на Придністров'я. Площа області 26513 км². Область займає майже 4,5% території України [4].

В геоструктурному плані основна частина території області припадає на південно-західну окраїну Українського кристалічного масиву, складеного архей-протерозойськими метаморфічними породами і тільки її південно-західна окраїна розташована на Волино-Подільській плиті, де породи фундаменту перекриті відносно потужною товщею більш молодих, переважно осадових відкладів.

Подільське плато займає більшу частину області. Воно продовжується далі на захід на території Хмельницької і Тернопільської областей. Зниження в рельєфі, по якому течуть ріки Снивода, Соб і Південний Буг, відокремлює

Подільське плато від Придніпровської височини, частина якої заходить на територію області.

На території Вінницької області Подільське плато має найбільшу висоту у Шаргородському районі. Максимальна висота – 384 м над рівнем моря. Поблизу села Степашки (Барський район) окрема ділянка плато має відмітку 382 м.

Взагалі плато не становить суцільної рівної поверхні і дуже порізане долинами численних невеликих річок та ярами. Та частина Подільського плато, що має нахил у бік Дністра, відзначається дуже великою роздробленістю на окремі пасма. Верхів'я річок Лядова, Немія, Жван, Мурафа, що течуть по дну широких розложистих балок, мають пологі схили, і тому рельєф цієї місцевості має вигляд хвилястої рівнини, а з наближенням долин річок до Дністра всі вони стають типово подільськими. Ріки глибоко врізаються в осадові породи, долини каньйоноподібні, цілком позбавлені терас, схили утворюють круті урвища з частими відшаруваннями вапняків та пісковиків. Глибокі долини річок Придністров'я надають цій частині області вигляду гірської місцевості. Східна і північно-східна частини Подільського плато в межах області значно менше розчленовані долинами річок.

У північно-східній частині області, від верхів'я Сниводи до Гірського Тікичу, лежить Придніпровська височина. Найбільш підвищена частина її має середню висоту 300 м. У північно-західній частині області Придніпровська височина має середню висоту від 250 до 300 м. Окремі підвищення є на північний захід від Вінниці (середня висота 300 м), на південь від Хмільника (середня висота - 300 м, найбільша - 345 м).

Низовин в межах області немає. Є окремі рівні ділянки території, що лежать нижче навколишньої місцевості. На північному заході області, між Південним Бугом і його притокою Згаром, лежить дуже заболочена Летичівська низина, її абсолютні висоти майже скрізь не перевищують 300 м.

Вінницька область багата нерудними корисними копалинами. Господарське значення мають родовища каолінів і будівельного каменя.

Найбільші з родовищ каоліну - Глуховецьке, Турбівське та Великогадомінецьке. На території області виявлено близько 50 родовищ гранітів, гнейсів, піщаників, найбільші з них - Вітовське, Гніванське, Стрижавське, Жежельївське. Є також родовища фосфоритів (Жванське), крейди, гіпсу, глини, піску. Паливні ресурси області обмежені і представлені торфом і бурим вугіллям. Ці ресурси мають місцеве значення. На території області відкриті джерела мінеральних вод - в Хмільнику (радонові води), у селі Житники, поблизу міста Козятин і в селі Липовці. Таким чином, мінерально-сировинні ресурси Вінницької області створюють гарну базу для швидкого розвитку її промисловості [4].

У Вінницькій області є густа мережа річок, що належать до басейнів трьох великих рік – Південного Буга (приблизно 62% території), Дністра (28%) та Дніпра (10%). Вони мають переважно снігове й дощове живлення і належать до типу рівнинних. Взагалі у області протікає 241 річка. Найбільшою річкою, що на значному протязі (317 км) протікає по території області і ділить її на дві майже рівні частини, є Південний Буг, який у межах області приймає 14 приток з лівого боку і стільки ж з правого. Найбільші притоки: Згар, Рів, Дохна, Соб, Снивода, Постолова, Десна.

На південному заході, на межі з Чернівецькою областю і Молдовою, протікає друга за розмірами річка України – Дністер. Притоки: Мурафа, Немиця, Лядова. До басейну Дніпра належать річки крайнього північного сходу області. Вони тільки частково протікають по території області: Рось, Оріхова і Роставиця.

До внутрішніх вод області належать численні ставки та водосховища. Тут налічується більше 2500 ставків, загальна площа їх перевищує 20 тис. га. В області розташовано 60 водосховищ. Найбільші водосховища – Ладжинське, Сандрацьке, Сутиське і Дмитренківське.

Болота на території Вінничини розташовані по долинах річок. Найбільше боліт у північній і середній частинах області. Найбільші площі боліт є вздовж Згару, Рову, Рівця, Собі, Соврані, Постолової, Десни [4].

Вінницька область лежить у межах лісостепової зони. Рослинність області характерна для лісостепу. Лісистість території складає 14,2%. Ліси Вінниччини належать до типу середньоєвропейських лісів. Основу лісової рослинності становить граб, а до звичайних тутешніх дерев належать: дуб, ясен, липа, клен, явір, берест, осика, тополя, дика груша, дика яблуня, черемха, черешня та інші.

Ґрунти в основному опідзолені (близько 65%). На північному сході області переважають чорноземи, в центральній частині - сірі, темно-сірі, світло-сірі, на південному сході і в Придністров'ї - чорноземи і опідзолені ґрунти. Більш 70% території області зорано.

Положення Вінницької області в системі одиниць фізико-географічного районування країни наступне:

- фізико-географічна країна – Південний захід Східноєвропейської рівнини;
- фізико-географічна зона – Лісостеп;
- фізико-географічний край – Дністровсько-Дніпровський лісостеповий край;
- фізико-географічні області – Північнопридніпровська височинна область, Придністровсько-Східноподільська височинна область, Середньобузька височинна область, Південноподільська височинна область.

1.2 Кліматичні умови

Клімат області – помірно-континентальний. Середня температура січня: $-3,5^{\circ}\text{C}$, середня температура липня: $19,9^{\circ}\text{C}$. Річна кількість опадів складає 611 мм, з них 73% випадають в теплий період. Зима характеризується тривалими й інтенсивними відлигами з підвищенням температури в окремі роки до $12-14^{\circ}\text{C}$. Характерною рисою термічного режиму взимку є порівняно невеликі зміни температури з місяця в місяць. Найбільше підвищення температури по всій зоні спостерігається в періоди березень-квітень та

квітень-травень. Дальше підвищення температури протікає значно повільніше.

Літній період відзначається високими й сталими температурами без значних змін по території області. В найтеплішому місяці - липні - середня температура становить 19,9°C. Температура серпня відрізняється від температури липня на 1°C. Найінтенсивніші зниження температури відбуваються протягом жовтня-листопада.

Перехід температур через 0°C навесні спостерігається у кінці третьої декади лютого (27.02), а восени - у третій декаді листопада (25.11), отже, зимовий період у Вінницькій області триває близько 90 днів [4].

Початок вегетаційного періоду у Вінницькій області спостерігається 31 березня, а його закінчення - 31 жовтня, тобто тривалість вегетаційного періоду для невимогливих до тепла сільськогосподарських культур складає 214 днів. Період активної вегетації (період с температурами вище 10°C) триває в середньому по області 169 днів. Його початок спостерігається 19 квітня, а закінчення – 31 жовтня. Перехід температур через 15°C навесні відзначається 18 травня, а восени – 7 вересня, тобто тривалість вегетаційного періоду для теплолюбних культур складає 111 днів [4].

Тривалість беззаморозкового періоду в повітрі становить 173 дні. В південних районах Вінницької області останні весняні заморозки в повітрі в середньому припадають на другу декаду квітня. У повітрі перші осінні заморозки бувають у середньому в першій декаді жовтня. Проте в окремі роки останні весняні заморозки в повітрі спостерігаються навіть у другій половині травня, а перші осінні - у вересні [4].

2 НАРОДНО-ГОСПОДАРСЬКЕ ЗНАЧЕННЯ ТА АКРОЕКОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТОПОЛІ

2.1 Народно-господарське значення тополі

Плантації швидкорослих дерев і деревовидних рослин (верба, тополя, акація і ін.) істотно відрізняються від традиційних сільськогосподарських або лісових посадок. Такі рослини висаджують приблизно на 10-15 років і збирають урожай кожні 2-5 років. Густота посадки дуже висока, до 25 тис. саджанців на гектар (в середньому близько 10 тис/га). Верба вирощується в основному в скандинавських країнах і Великобританії, тополя - в Центральній Європі, акація - в Середземноморському регіоні.

Біомаса з плантацій енергетичних культур може використовуватися як біомаса іншого походження (солома, лузга соняшника, відходи деревини), а саме, для отримання теплової та електричної енергії (пряме спалювання, спільне спалювання з викопними паливами, газифікація), для виробництва біогазу (анаеробне зброджування), гранул і брикетів. Найбільш перспективним сьогодні є спільне спалювання з вугіллям, виробництво біогазу і гранул [3].

Енергетична тополя вирощується у таких країнах Європи, як Австрія, Бельгія, Великобританія, Німеччина, Данія, Ірландія, Італія, Швеція. Згідно з новою політикою ЄС у сфері сільського господарства, з 2003 р. вирощування енергетичних культур субсидується в розмірі 45 євро/га в рік. До 2006 р. субсидія поширювалася на площу 1,5 млн. га без поділу за окремими країнами. У 2006 р. Європейська Комісія запропонувала збільшити цю площу до 2 млн. га і дозволити додаткові національні субсидії на вирощування енергетичних культур [3].

Досвід країн Європи (Швеції, Данії, Польщі та ін.) підтверджує, що вирішення проблеми енергозабезпечення можливе за максимального використання власних, місцевих поновлюваних енергетичних ресурсів та

альтернативних джерел енергії паралельно з ефективним споживанням імпортованої енергії [5].

У Німеччині, Великобританії, Швеції та інших країнах Європи вже більш як 10 років біомасу тополь використовують для виготовлення біоетанолу та у вигляді пелетів для опалення будинків [6].

Цікавим і гідним наслідування прикладом є Італія, де вирощування швидкоростучої тополі і постачання біомаси на електростанції - це добре налагоджений комерційний процес. Ринок контролюється кількома приватними корпораціями, кожна з яких включає компанію по створенню нових клонів рослини і кілька консультаційних фірм [3].

Тільки за останні кілька років на півночі Італії висаджено понад 5 тис. га нових плантацій тополі. Основна частина (4 тис. га) знаходиться в Ломбардії, яка першою ввела додаткові гранти на вирощування енергетичних культур. Врожайність деревини досягає 30-35 т/га щорічно.

В даний час енергетичні культури в Данії вирощуються на 62 тис га, що становить 2,2% загальної площі сільськогосподарських земель. Найбільшу територію займає ріпак, плантації тополі займають 67 гектарів. Основним способом утилізації біомаси енергетичних культур є пряме спалювання, хоча все більша увага приділяється виробництву біогазу.

Використовуючи потенціал енергетичних культур і відходів рослинництва, США можуть покрити 14% своєї потреби в електроенергії. Вирощування і утилізація енергетичних культур є важливою складовою нового Плану розвитку біоенергетики до 2030 р., прийнятого в кінці 2007 р.

Яскравим прикладом політики альтернативного енергозабезпечення є Польща, яка для отримання деревної біомаси в процесі плантаційного лісовирощування використовує понад 200 видів тополь та верб [5].

В Україні вирощування енергетичних культур знаходиться на дослідницькій стадії. Але, згідно з енергетичною політикою ЄС останнім часом в Україні вирощування та використання деревної сировини як одного з найдоступніших відновлювальних джерел отримання енергії набуває

актуальності в енергетичній сфері [4]. Дослідники НДІ екобіотехнологій та біотехніки Національного аграрного університету України досягли успіхів у виведенні нових клонів тополі и мають власні експериментальні плантації [7].

Необхідно відзначити, що окрім відновлювального джерела енергії представники тополь виконують численні екологічні функції. Відомо, що одне доросле дерево тополі поглинає 180 г оксиду сірки (SO_2) за вегетаційний період, а середня відносна стійкість до газових викидів в тополі становить 3-4 бали. Тополі також виконують інші важливі екологічні функції, до яких відносяться: очищення і збагачення повітря киснем, водоохоронні, водорегулюючі, ґрунтозахисні, санітарно-гігієнічні. Тополі характеризуються широкою екологічною пластичністю і першими заселяють техногенні ландшафти [8].

Як вже відзначалося, тополя відіграє суттєву роль у формуванні полезахисних лісових смуг (ПЗЛС). Як відомо такі смуги в зоні Степу та Лісостепу сприяють захисту ґрунту від різних видів ерозії, а сільськогосподарських угідь від несприятливих кліматичних чинників (зменшується швидкість вітру, зберігається сніговий покрив, на полях накопичується волога).

Дослідження фахівців Українського науково-дослідного інституту лісового господарства та агролісомеліорації імені Г.М. Висоцького [9] показали, що у Херсонській області дефляційно-небезпечні території займають 60% загальної площі. Аналіз стану лісосмуг на території Олешківського району показав, що плантації різних видів та гібридів тополі займають друге місце (майже 23% всіх лісосмуг). Середній діаметр дерев на досліджуваних ділянках становив 31 см, діаметр окремих дерев досягав 49 см. Середня висота дерев становила 12–14 м, окремих – до 18–22 м. Хоча більшість лісосмуг вже досить старі, мають значну кількість сухостою і потребують проведення відновлювальних заходів, можна сказати, що за минулі роки саме завдяки вирощуванню тополі на території Олешківського району створено основу для захисту ґрунтів від негативної дії суховіїв.

Висока стійкість до промислового забруднення у великих індустріальних місцях та здатність до акумуляції важких металів без пошкодження рослини дозволяють використовувати рослини роду тополя у якості біоіндикаторів чи фітоіндикаторів забруднення навколишнього середовища [10].

Дослідження [11] показали, що листя тополі накопичують елементи з ґрунту, а також вловлюють пилоаерозолі з атмосферного повітря за рахунок особливостей будови листа: шорсткості поверхні, наявності клейкого воску, розташування продихів на обох боках листової пластинки. Така концентрація елементів листям тополь відбиває короточасний (4–5 місяців) накопичувальний ефект. Рівні концентрації основних макроелементів, елементів домішок, включаючи радіоактивні, в золі листя тополі, закономірно відображають геохімічну спеціалізацію урбанізованих територій як в промислово розвинених, так і у фонових районах.

Можливості використання тополь для біологічної рекультивації техногенних ландшафтів описані в роботі [12].

Тополя також є джерелом целюлози і природних біологічно активних речовин. Тому ця культура заслуговує на широке застосування в лісовому господарстві, захисному лісорозведенні, фітомеліорації і озелененні [8].

В умовах сучасного забруднення навколишнього середовища великих місць пилом, вихлопними газами від машин, електромагнітним випроміненням та шумом суттєво зростає роль зелених насаджень. В містах зелені рослини виконують цілий ряд важливих функцій: вони збільшують вологість повітря, виділяють фітонциди, екранують шум, зменшують силу вітру та знижують температуру повітря в жару [13].

Крім того, рослини роду тополя є фітоіндикаторами забруднення навколишнього середовища важкими металами, оскільки вирізняються особливою стійкістю до промислових викидів, здатністю до акумуляції важких металів без пошкодження рослини [10].

Рослини роду *Populus* завдяки своїй великій стійкості до промислових забруднень та вихлопних газів є незамінними в умовах урбанізованого середовища. Відомо, що одне доросле дерево тополі поглинає 180 г оксиду сірки (SO₂) за вегетаційний період, а середня відносна стійкість до газових викидів в тополі становить 3-4 бали [13].

Переваги тополевих в покращенні урбанізованого середовища визначаються здатністю досить добре зростати на ґрунтах, різних за механічним складом та рівнем родючості; вибагливістю і, в водночас, толерантністю до умов ґрунтового зволоження; високою стійкістю та низькою чутливістю до промислових забруднень; здатністю поглинати забруднюючі речовини з атмосфери та виділяти фітонциди; наявністю розгалужених крон з густим листям (що підвищує інтенсивність шумозаглушення; високими естетично-декоративними якостями, особливо у дерев з декоративними пірамідальними і плакучими кронами [14].

2.2 Ботанічна та агроекологічна характеристика тополі (*Populus*)

Тополя - дводомне листопадне швидкоросле дерево роду *Populus* родини Вербові (*Salicaceae*). Всього у світі зростає близько 110 видів тополі. На території Росії - близько 30, з них 12 видів були завезені з Європи, Америки, Індії та Китаю.

Деякі види (осокір, тополя запашна та лавролиста) зростають за Полярним колом. Найбільшого поширення тополя набула в лісовій і лісостеповій зонах, а в степовій і напівпустельній зонах зростає в заплавах річок і біля озер [2].

Серед швидкозростаючих порід тополі належить перше місце. Ця культура прижилася практично на всій території Євразії і займає великі площі. Наприклад, сьогодні в Росії площа, зайнята тополями, становить приблизно 19,75 млн. га з запасом деревини 2 614,81 млн м³. У ряді регіонів можлива успішна організація швидкозростаючих тополевих плантацій, які

дозволятимуть вирощувати великі обсяги деревини на одиниці площі з отриманням середньорічного приросту в розмірі 30-40 м³/га [8]. Вирішення цього завдання полегшується тим, що вже виведені і широко культивуються високопродуктивні та цінні за своїми якостями сорти тополі. З огляду на біологічні та екологічні особливості тополі, були визначені зони її раціонального вирощування та використання.

Так, наприклад, в зоні хвойно-широколистяних лісів доцільно висаджувати тополі, стійкі до гнилі: осіку (*P. adenopoda*), бальзамічну (*P. balsamifera*), волосистоплідну (*P. trichocarpa*), берлінську (*P. berolinensis*), запашну (*P. suaveolens*), білу або сріблясту (*P. alba*), чорну або осокір (*P. nigra*), сіру або сизолисту (*P. pruinosa*). В степу краще приживаються тополі: канадська (*P. canadensis*), біла, чорна, пірамідальна (*P. pyramidalis*), тополя Болле (*P. Bolleana*) та лавролиста (*P. laurifolia*) [2].

Згідно з міжнародною класифікацією [6, 15], рід налічує 5 секцій: бальзамічні (справжні) тополі, чорні тополі (осокір), білі тополі, білоподібні тополі, туранга. Таким чином, кількість видів, що належать роду *Populus*, коливаються від 20 до 110 [7]. Останнім часом у зв'язку з введенням у культуру нових цінних гібридів, що найбільш придатні для вирощування в Україні, систематика тополь була уточнена [10]. Як в Україні, так і за її межами досі триває дискусія в науковому світі про необхідність проведення певних змін у систематиці тополь для більш глибокого відображення особливостей організації цього роду [7, 15, 16].

За здатністю до швидкого зростання серед енергетичних культур тополі є піонерськими деревами. У Європі культивують тополі, що виростають до висоти 30-35 м, а гібрид *Populus* × *canadensis* здатний досягати 50 м [17].

Представники роду *Populus* L. дуже відрізняються між собою за здатністю адаптації до умов навколишнього середовища, проте їм усім потрібні живильні речовини (мезотрофи), а найкращий розвиток їх відбувається за постійної високої або середньої вологості ґрунту. Вологоспоживання одного дерева тополі становить близько 4,8 мм на добу.

Зрошення є плантацій є доцільним, якщо річна кількість опадів на території вирощування менше 600 мм. В цілому тополя більше вимоглива до води, ніж інші сільськогосподарські культури, тому надзвичайно сухого ґрунту слід уникати [17]. Практично всі культивари тополі не витримують затінення [5].

В Угорщині тополя вважається основною культурою для плантаційних посадок (в державному реєстрі деревних культур знаходиться під номером 22) [18]. Угорські спеціалісти по створенню енергоплантацій вважають однією з головних умов вирощування клонів тополі наявність достатньої кількості вологи. Тополя вирощується на ґрунтах, що аеруються, забезпечених поживними речовинами. Клонам тополі також сильно потрібне сонячне світло. В першу чергу їх вирощують на рівнинній місцевості з хорошим вологозабезпеченням. За даними багаторічних спостережень відомо, що у вегетаційний період тополя потребує температур повітря близько 14 °С. Величина біомаси тополі напряму залежить від кількості вологи. У континентальній кліматичній зоні, в якій зазвичай вирощують тополь, достатня кількість опадів за вегетаційний період (порядку 750-900 мм), спостерігається рідко, тому рекомендують посадки проводити на місцях з високим рівнем ґрунтових вод. Це дозволяє кореням дерев отримати вологу з розчиненими поживними речовинами.

Угорські вчені вважають, що для отримання добрих результатів необхідно, щоб глибина ґрунтових вод в квітні становила 150-220 мм, а постійна глибина ґрунтових вод повинна становити 80-150 мм. Для отримання 1 м³ біомаси тополі необхідно близько 360 мм опадів [18].

Мінімальна температура зростання тополі коливається від 5°С до 10 °С, максимальна - від 30°С до 40°С; оптимальний діапазон температур зростання становить 15-25°С. Рід *Populus* L. вирізняється широкою амплітудою за відношенням до морозів, що і стало наслідком розповсюдження його представників майже на всій земній кулі. Цікавим є те, що гібриди тополь, зазвичай, займають середнє положення за морозостійкістю, порівняно з

батьківськими особинами, або давно відомими уже видами. Однак за від'ємної температури 30 °С і нижче рослини не виживають [17].

Тополя успішно росте на досить широкому діапазоні типів ґрунтів - на піщаних, суглинистих, глинистих та дрібних супіщаних ґрунтах, багатих на органічні речовини. Найбільш придатні для тополі ґрунти слабо лужної та нейтральної реакції ґрунтового розчину (рН 5,5 - 7,0), а оптимальне значення рН становить 6,5. Надзвичайно чутливі тополі до підвищеної засоленості та кислотності ґрунту [17].

Найбільше підходящими для вирощування тополі є ділянки з проточними ґрунтовими водами, що залягають на глибині 1-1,5 м і збагачені поживними речовинами та вапном. На бідних і недостатньо зволжених ґрунтах тополя хоча й росте, але продуктивність її плантацій є дуже низькою. Тому при плануванні площ під культурою тополі необхідно проводити їх попереднє обстеження [19].

Існує також велика кількість гібридних культур тополі, виведені з метою отримання кращих форм швидкозростаючих порід. Для промислового вирощування деревини на енергетичних плантаціях и для отримання біомаси були виведені такі сорти тополі: Градежський, Тронка, Гулівер, Стріловидний, Келібердинській та ін. [2].

У регіонах помірного клімату серед джерел деревини для виробництва біоенергії тополі викликають особливий інтерес як найбільш швидкоростучі там дерева. У роботі [20] представлені результати дослідження продуктивності стовбурної деревини у 25-річних дерев різних морфолого-систематичних груп тополь у Центральному Чорнозем'ї. Усереднені величини запасу деревини становили 220-630 м³/га, біомаси стовбурної деревини - від 100 до 280 т/га, кількості тепла, що виділяється при згорянні – 320-940 Гкал/га, енергетичного потенціалу – 1390-4030 ГДж/га.

В цілому, вивчення продуктивності насаджень і кількості виробленої біомаси тополь різних морфолого-систематичних груп, а також розрахунки їх

енергетичного потенціалу показують їх високу перспективність для культивування у якості поновлюваного джерела біоенергії.

Таким чином:

- швидко зростаюча тополя є однією з кращих культур для енергоплантацій;
- використання сортового посадкового матеріалу дозволяє істотно підвищити продуктивність та якість культур і плантацій, скоротити терміни вирощування деревини цих порід;
- енергоплантації сприяють оздоровленню ландшафтів і відновленню екосистем, дають можливість рекультивації непридатних для сільського господарства ґрунтів;
- транспортні і заготівельні засоби, що використовуються в підприємствах лісозаготівлі, можуть бути переведені на паливо з деревної біомаси шляхом оснащення їх газогенераторним устаткуванням, що обумовлено екологічною політикою (деревина тополевих порід - CO₂-нейтральний вид палива) і економічною доцільністю застосування місцевих видів палива;
- розвиток автотранспортних, газогенераторних технологій підвищить енергетичну забезпеченість того чи іншого регіону за рахунок організації поставок палива на базі місцевих поновлюваних ресурсів, поліпшить екологічну ситуацію;
- створення енергоплантацій тополі, крім економічного, має і важливий соціальний аспект - дає можливість створювати нові робочі місця і підвищувати якість життя людей [2].

Існують різні види тополі, серед яких для умов України фахівці рекомендують тополю Торопогрицького (гібрид тополі євроамериканської і пірамідальної). Він характеризується високою продуктивністю і стійкістю до несприятливих умов. У звичайних умовах середній приріст тополі Торопогрицького становить 14 м³/га на рік, а при високій зволоженості ґрунту цей показник може вирости майже до 37 м³/га на рік [21].

Вирощування тополі, як і всіх енергетичних культур можна умовно розбити на 3 етапи:

- 1) підготовка ґрунту;
- 2) безпосередньо вирощування (посадка, догляд за плантацією);
- 3) збір врожаю (заключною операцією є ліквідація плантації після закінчення строку її існування) [22].

Тополя стійка до шкідників, може рости на бідних ґрунтах і забруднених землях, однак вона менш морозостійка, ніж верба, тому, як правило, не вирощується в північноєвропейських країнах. Культура практично не вимагає застосування пестицидів і добрив. З плантації енергетичної тополі можна отримувати біомасу в обсязі 8-15 сух. т/га в рік, а на хороших ґрунтах нові клони можуть давати до 16-20 сух. т/га в рік [22].

Енергетичну тополю можна вирощувати за трьома технологіями: плантації з дуже швидким, швидким і середнім оборотом. Вони різняться кількістю насаджень на гектар і частотою збору врожаю. У першому випадку щільність посадки – 10-15 тис. рослин на га, врожай збирають інтервалом в 1 рік, діаметр стовбура на рівні зрізу становить 2-3 см. На плантаціях з швидким оборотом на гектар висаджують 5-10 тис. рослин, врожай збирають кожні 2-3 роки, діаметр стовбура на рівні зрізу досягає 10-12 см. В третьому випадку щільність посадки становить 1,3-3 тис. шт./га, збір врожаю виконують з інтервалом в 5-6 років, діаметр стовбура (на рівні близько 1,3 м) – до 15 см [22].

Досвід Європи показує, що, як правило, більша продуктивність спостерігається на плантаціях з середнім оборотом. Термін існування плантації енергетичної тополі – 15-20 років. При 3-річному циклі вирощування за цей період можна зібрати 5-7 врожаїв. Ліквідація плантації є досить трудомістким процесом, оскільки тополя часто формує великий стрижневий корінь [22].

2.3 Поточний стан розвитку біоенергетики в Україні

Біомаса є перспективним джерелом енергії як у світі, так і в Україні. На даний час біомаса займає четверте місце у світі за обсягами її енергетичного використання. Протягом останніх років в Україні спостерігається поступове зростання кількості об'єктів і встановленої потужності для виробництва теплової та електричної енергії з біомаси. Стале використання біомаси дасть змогу зменшити енергетичну залежність України та забезпечити використання місцевого ресурсного потенціалу. Позитивний соціальний вплив очікується за рахунок створення нових робочих місць, зниження тарифів на теплову енергію та покращення надійності теплопостачання.

Роль біоенергетики є особливо значною у виробництві теплової енергії, оскільки біомаса може напряду замінювати природний газ і вугілля, що є дуже важливим для України.

Для розвитку і просування біоенергетики в Україні створено Біоенергетичну організацію – БАУ (UABIO). Це неприбуткова громадська спілка, яка об'єднує бізнес та експертів для розвитку біоенергетики в Україні. Проаналізувавши дані Державної служби статистики фахівці цієї організації зробили висновок стосовно обсягів імпорту енергоносіїв, які становлять величезні цифри (табл. 2.1). Можна бачити, що протягом 2019 рр. першими у цьому переліку йдуть нафта і нафтопродукти, дизельне паливо і вугілля. Саме ці три статті є найбільшими по чинності статтями українського імпорту. Тобто у цілому на закупівлю енергоносіїв у минулому році Україна витратила близько 15 млрд доларів.

Фахівці UABIO вважають, що за рахунок розвитку біоенергетики можна значно скоротити витрати на імпорт енергоресурсів і заощадити валютні кошти. Ресурси біомаси для виробництва енергії в Україні у теперішній час представлені у табл. 2.2 (дані взяті з доповіді голови UABIO Георгія Гелетухи “Біомаса – альтернатива природному газу”, яку можна бачити за посиланням <https://www.youtube.com/watch?v=iI9FE53zIX4&t=143s>).

Таблиця 2.1 – Імпорт енергоносіїв у 2019 р. в Україні

Вид енергоресурсів	Обсяг та кошти
Природний газ	11,77 млрд м ³ на суму 2,31 млрд доларів
Бензин	1,04 млн т на суму 0,65 млрд доларів
Дизельне паливо	6,26 млн т на суму 3,92 млрд доларів
Кам'яне вугілля	21,08 млн т на суму 2,83 млрд доларів
Нафта і нафтопродукти	8,43 млн т на суму 5,36 млрд доларів
Сума імпорту	15,06 млрд доларів

Дані статистичного збірника “Зовнішня торгівля України” Державної служби статистики України, 2020 р.

Таблиця 2.2 – Енергетичний потенціал біомаси в Україні (за даними БАУ)

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн т	Потенціал, доступний для енергетики (економічний)	
		Частка теор. потенціалу, %	млн т н.е.
Солома зернових культур	32,8	30	3,36
Солома ріпаку	4,9	40	0,68
Побічні продукти виробництва кукурудзи на зерно (стебла, стрижні)	46,5	40	3,56
Побічні продукти виробництва соняшника (стебла, корзинки)	26,9	40	1,54
Вторинні сільськогосподарські залишки (лушпиння соняшника)	2,4	100	1,00
Деревна біомаса (паливна деревина, порубкові залишки, відходи деревообробки)	8,8	96	2,06
Деревна біомаса (сухостій, деревина із захисних лісосмуг, відходи ОВБСН)	8,8	45	1,02
Біодизель (з ріпаку)	-	-	0,39
Біоетанол (з кукурудзи і цукрового буряку)	-	-	0,82
Біогаз з відходів та побічної продукції АПК	2,8 млрд м ³ CH ₄	42	0,99
Біогаз з ТПВ	0,6 млрд м ³ CH ₄	29	0,14
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)	0,4 млрд м ³ CH ₄	28	0,09
Енергетичні рослини:			
- верба, тополя, міскантус*;	11,5	100	4,88
- кукурудза (на біогаз)*.	3,0 млрд м ³ CH ₄	100	2,57
Всього	-	-	23,10

* За умови вирощування на 1 млн га незадіяних сільськогосподарських земель.

Як можна бачити, ресурси вироблення біоенергії становлять близько 23 млн нафтового еквіваленту. Перша головна складова цих ресурсів – це відходи і залишки сільськогосподарського виробництва (солома, стебла кукурудзи та соняшника). Причому фахівці БАУ рекомендують використовувати саме на енергетичні цілі лише 30-40% наявного потенціалу, залишаючи 60-70% на інші цілі – перш за все для використання у якості добрива, для підтримання родючості ґрунтів.

Друга головна складова біоенергетичного балансу – це вирощування енергетичних рослин, причому на 1 млн га планується вирощувати вербу, тополю і міскантус, а на другому – кукурудзу на силос, який потім буде зброджуватись для отримання біогазу. За таким сценарієм потенціал саме енергетичних рослин складає 7,45 млн т у нафтовому еквіваленті.

Таким чином, у використання біомаси у якості альтернативи викопним енергоресурсам у нашій країні має дуже широкі перспективи і сприятиме зниженню залежності країни від іноземних поставок енергоресурсів.

Також важливо те, що викиди парникових газів від спалювання біомаси значно нижчі порівняно з викидами від викопного палива (вугілля, нафти та природного газу). Отже, біоенергетика відіграє важливу роль у декарбонізації енергетичного сектору і скороченні емісії парникових газів.

3 ВПЛИВ ЗМІН КЛІМАТУ НА АГРОКЛІМАТИЧНІ УМОВИ ВИРОЩУВАННЯ ЕНЕРГОПЛАНТАЦІЙ ТОПОЛІ

3.1 Сучасні відомості щодо змін клімату

За даними науковців в період 1981-2010 рр. середньорічна поверхнева глобальна температура становила 14°C [23]. Дані палеокліматологів та систематичних спостережень всесвітньої гідрометеорологічної мережі вказують на те, що величина глобальної температури не є незмінною величиною. Вона змінювалась як в історичному масштабі, так і в сучасний період. Наприклад, в період 1880-2012 р. температура виросла на 0,85°C [24].

Оскільки основним джерелом енергії на Землі є Сонце, то зміна потоку сонячної енергії, що надходить до Землі, впливає на її термічний режим. Причому, є природні фактори, що впливають на потік сонячної енергії (зміни форми земної орбіти та положення земної осі відносно площини земної орбіти, циклічні зміни світимості Сонця), а також існують причини зміни земного клімату, що пов'язані зі змінами властивостей атмосфери та земної поверхні. Іншими словами, згідно з [24] “термічний режим, що складається, залежить не тільки від того, на скільки інтенсивно світять на предмет, але й від властивостей цього предмету”.

Як відомо, атмосфера впливає на формування термічного режиму Землі коли: частина потоку сонячного випромінення розсіюється і переспрямовується назад у космос, частина потоку сонячного випромінення поглинається атмосферою, більша частина потоку інфрачервоного випромінення земної поверхні та шарів атмосфери захоплюється деякими газами і частково переспрямовується назад до земної поверхні (це явище називається парниковий ефект).

Важливим є те, що основні складові частини атмосфери – гази азот, кисень та аргон _ в цьому процесі участі не приймають, оскільки з

інфрачервоним випроміненням практично не взаємодіють. Цей ефект спричиняють газові складові, що присутні в атмосфері у незрівнянно менших кількостях – водяна пара (H_2O), вуглекислий газ (CO_2), метан (CH_4), озон (O_3) та інші сполуки. У відповідності до того ефекту, який вони створюють, ці гази називаються парниковими [24].

У порівнянні з 1750 роком концентрація CO_2 в атмосфері зросла на третину: з 280 до 380 млн^{-1} (тобто на мільйон літрів повітря доводиться 380 літрів CO_2), причому різке зростання припадає на останні десятиліття ХХ століття.

Концентрація метану - другого за нинішнім впливом на клімат парникового газу після CO_2 , зросла в 2,5 рази. Тренд ще одного парникового газу - закису азоту - дорівнює 17-20% . Такого в останні сотні тисяч років не було ніколи.

Парниковий ефект добре вивчений вченими. Він спричиняється водяною парою, вуглекислим газом, метаном, закисом азоту і рядом інших менш значних газів, які поглинають частину тепла - довгохвильову радіацію, що випромінює Земля.

За даними Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) на планеті відбувається аномальне зростання температури. За всю історію інструментальних спостережень ніколи не було такого тривалого і сильного потепління. Дані охоплюють всі континенти і океани. В світі в цілому потепління становить близько $0,8^\circ\text{C}$. Основне зростання значень температури відбувається протягом останніх 30 років, що служить індикатором виникнення нового чинника, що впливає на клімат - саме в цей час глобальні концентрації CO_2 і метану в атмосфері почали зростати особливо швидко.

В оціночній доповіді Н. Стерна [25] наводяться приклади можливого впливу змін клімату на різні галузі економіки та життя людей в залежності від зростання середньої глобальної температури в масштабі ХХІ – ХХІІ століть.

Так, підвищення температури на 1°C починається ослаблення термохалінної циркуляції вод Атлантичного океану. У цьому випадку можуть

повністю зникнути невеликі льодовики в Андах, що спричинить проблеми у водозабезпеченні близько 50 млн чоловік. Стосовно урожайності сільськогосподарських культур у цьому випадку можна очікувати навіть незначне збільшення урожайності зернових у середніх широтах.

За підвищення температури на 2°C відповідно на 20–30% зменшаться водні ресурси у ряді найбільш чутливих регіонів, наприклад, у Середземномор'ї та Середній Азії. Також у цьому випадку очікується різке скорочення урожаїв сільськогосподарських культур у тропічних регіонах.

Якщо температура підвищується на 3°C, кожні 10 років у Південній Європі відбуватимуться серйозні посухи, тому очікується, що 1–4 млрд чоловік будуть змушені скорочувати вживання води, а з іншого боку при цьому 1–5 млрд чоловік проживатимуть у зонах з ризиком повеней. Під загрозою голоду опиняться додатково 150–550 млн чоловік. Від 1 до 3 млн чоловік загинуть від недоїдання.

Ще більш катастрофічні наслідки слід очікувати при подальшому підвищенні температури. Приведені дані щодо втрат та загроз повинні слугувати серйозним попередженням для того, щоб не допустити підвищення температури більш ніж на 2°C від доіндустріального рівня.

В довгостроковій перспективі ймовірність того, що температура підвищиться більш ніж на 5°C, становить більш 50%. Таке підвищення буде надзвичайно небезпечним. Детальне вивчення регіональних наслідків змін клімату з використанням економічних моделей вказує на те, що навіть за більш помірною рівня потепління слід очікувати серйозних впливів на світову економіку, людське життя та навколишнє середовище.

В цілому вплив зміни клімату на сільське господарство нашої країни може відбуватися за двома сценаріями: аридним і гумідним. У першому випадку очікується падіння урожайності зернових і кормових культур по всій території степової та лісостепової зон. До середини XXI ст. підвищення посушливості стане головним ефектом в найбільш родючих районах, тому падіння врожайності зернових через це може перевищити 20% і стати

критичним для економіки регіонів. Доведеться проводити іригацію і переходити на вирощування більш посухостійких культур.

При гумідному (вологодому) потеплінні до середини ХХІ ст. очікується збільшення урожайності, після чого відбудеться падіння [25].

Оскільки відомості щодо вимог деревних енергокультур до агрометеорологічних умов у літературі, особливо стосовно території України, з'явилися у літературних джерелах досить недавно, для виконання розрахунків у роботі ми приймаємо, що найбільш активно весняні процеси відбуваються у тополі з переходом температури повітря через 10°C. Кінець вегетації нами був прийнятий у відповідності до дати переходу температури повітря через 10°C восени.

У даній кваліфікаційній роботі для кліматичних розрахунків використовуються три з набору сценаріїв Репрезентативних траєкторій концентрацій (Representative Concentration Pathways – RCP). Репрезентативні траєкторії концентрацій – сценарії, які включають часові ряди викидів і концентрацій всього набору парникових газів, аерозолів і хімічно активних газів [26].

Сценарії RCP визначаються приблизною сумарною величиною радіаційного впливу до 2100 року порівняно з 1750 р.: 4,5 Вт·м⁻² для RCP4.5; 6,0 Вт·м⁻² для RCP6.0 і 8,5 Вт·м⁻² для RCP8.5. Є ще сценарій, який передбачає низький рівень впливу (RCP2.6), але за даними вчених-кліматологів, на сьогоднішній день його реалізація вже вважається нереальною. Ми розглядали два сценарії стабілізації (RCP4.5 і RCP6.0) і сценарій з дуже високими рівнями викидів парникових газів (RCP8.5) [26].

3.2 Базова модель оцінки агрокліматичних ресурсів А.М. Польового

Модель заснована на концепції максимальної продуктивності рослин Х.Г. Тоомінга [27, 28], та запропонована в агрометеорології А.М. Польовим [29].

Базова модель, на основі якої виконувались наші розрахунки, має блочну структуру і містить такі блоки):

- блок вхідної інформації;
- блок показників сонячної радіації і волого-температурного режиму;
- блок функцій впливу фази розвитку і метеорологічних факторів на продукційний процес рослин;
- блок родючості ґрунту;
- блок агроекологічних категорій урожайності;
- блок узагальнюючих оцінюючих характеристик.

Розглянемо більш докладно основні блоки моделі.

3.2.1 Блок вхідної інформації

Цей блок складається із даних стандартних метеорологічних і агрометеорологічних спостережень і містить у собі всі необхідні для виконання розрахунків характеристики. Вони поділяються на дві групи:

Перша група – запаси продуктивної вологи у ґрунті, середньодекадна температура повітря, середня за декаду кількість годин сонячного сяйва, сума опадів за декаду, середній за декаду дефіцит насичення повітря, кількість днів у розрахунковій декаді.

Друга група – інформація про внесення доз азотних, фосфорних і калійних добрив, дані про оптимальні дози цих добрив, дані про внесення органічних добрив та їхній оптимальній дозі, рік внесення органічних добрив, бал ґрунтового бонітету.

3.2.2 Блок показників сонячної радіації і волого-температурного режиму

Для розрахунку інтенсивності сумарної сонячної радіації використовується формула С.І. Сівкова

$$Q_o^j = 12,66 \cdot (SS^j)^{1,31} + 315 \cdot (A^j + B^j)^{2,1}, \quad (3.1)$$

де Q_o – сумарна сонячна радіація, що приходиться на горизонтальну поверхню, кал/см²·доба;

SS – середня за декаду кількість годин сонячного сяйва;

j – номер розрахункової декади;

A і B – проміжні характеристики, що визначаються в залежності від широти місцевості та схилення Сонця.

Для розрахунку випаровуваності E_o використовується метод А.М. Алпат'єва:

$$E_o^j = 0,65 \cdot DWW^j \cdot dv^j \cdot 0,75, \quad (3.2)$$

де DWW – середній за декаду дефіцит насичення повітря;

dv – кількість днів у розрахунковій декаді.

Сумарне випаровування визначається за формулою С.І. Харченко

$$E^j = \frac{2W^j + O_s^j}{1 + \frac{2W_{HB}}{\beta E_o^j}}, \quad (3.3)$$

де E – сумарне випаровування, мм;

W_{HB} – найменша вологоємність у шарі ґрунту 0-100 см;

O_s – сума опадів за декаду, мм;

W – запаси продуктивної вологи у метровому шарі ґрунту, мм;

β – параметр, який залежить від фази розвитку рослин. Його середнє значення для злакових культур складає 2,0.

За допомогою наступного співвідношення розраховується інфільтрація у нижні шари ґрунту

$$F_{ilt}^j = W^j + O_S^j - E^j - W_{HB}, \quad (3.4)$$

де F_{ilt} – інфільтрація в нижні шари ґрунту за декаду, мм.

Для розрахунку запасів продуктивної вологи на схилі використовується рівняння водного балансу

$$W^{j+1} = W^j + O_S^j - E^j - F_{ilt}^j. \quad (3.5)$$

3.2.3 Блок функцій впливу фази розвитку і метеорологічних факторів на продукційний процес рослин

В основі продукційного процесу рослин лежить фотосинтез. Його інтенсивність обумовлюється фазою розвитку рослин і умовами навколишнього середовища. Для розрахунку онтогенетичної кривої фотосинтезу використовується формула

$$\alpha_{\Phi}^j = \exp \cdot \left[-a_{\Phi} \left(\frac{TS_2 - \Sigma t_1}{10} \right)^2 \right], \quad (3.6)$$

де величина α_{Φ} знаходиться за виразом

$$\alpha_{\Phi} = \frac{-100 \cdot \ln \alpha_{\Phi}^0}{(\Sigma t_1)^2}, \quad (3.7)$$

де α_{Φ} – онтогенетична крива фотосинтезу, відн. од.;

α_{Φ}^0 – початкове значення онтогенетичної кривої фотосинтезу, відн. од.;

Σt_1 – сума ефективних температур повітря від сходів, при якій спостерігається максимальна інтенсивність фотосинтезу рослин, °С;

TS_2 – сума ефективних температур, °С.

Функція впливу температури повітря на продукційний процес рослин визначається як

$$\psi_{\Phi} = \begin{cases} 13,7 \cdot \sin(0,077 \cdot x_1^j) & \text{при } (T^j - T_{\Phi}) < T_{opt1}^j, \\ 1 & \text{при } T_{opt1} \leq (T^j - T_{\Phi}) \leq T_{opt2}^j, \\ 1,13 \cdot \cos(1,570 \cdot x_2^j) & \text{при } (T^j - T_{\Phi}) > T_{opt2}^j, \end{cases} \quad (3.8)$$

де ψ_{Φ} – температурна крива фотосинтезу, відн. од.;

T – середньодекадна температура повітря, °С;

T_{Φ} – середньодекадна температура повітря, при якій починається фотосинтез, °С;

T_{opt1} – нижня межа температурного оптимуму для фотосинтезу, °С;

T_{opt2} – верхня межа температурного оптимуму для фотосинтезу, °С.

У рівнянні (3.8) проміжні величини знаходяться за формулами

$$x_1^j = (T_s^j - T_{\Phi}) / (T_{opt1}^j - T_{\Phi}), \quad (3.9)$$

$$x_2^j = (T_s^j - T_{opt2}^j) / (T_{max} - T_{opt2}^j), \quad (3.10)$$

де T_{max} – середньодекадна температура повітря, при якій припиняється фотосинтез, °С;

T_s – температура повітря на горизонтальній поверхні, °С.

Значення нижньої і верхньої межі температурного оптимуму для фотосинтезу визначаються як функції часу.

Функція впливу вологості ґрунту на фотосинтез γ_{Φ} знаходиться як

$$\gamma_{\phi} = \begin{cases} -1,163 \cdot (x_3^j)^2 + 2,187 \cdot x_3^j & \text{при } W^j < W_{opt1}^j, \\ 1 & \text{при } W_{opt1}^j \leq W^j \leq W_{opt2}^j, \\ -0,654 + 3,824 \cdot x_4^j - 2,633 \cdot (x_4^j)^2 + 0,467 \cdot (x_4^j)^3, & \\ & \text{при } W^j > W_{opt2}^j, \end{cases} \quad (3.11)$$

де W – запаси продуктивної вологи у метровому шарі ґрунту, мм;

W_{opt1} – нижня межа оптимальних запасів вологи, мм;

W_{opt2} – верхня межа оптимальних запасів вологи, мм.

$$x_3^j = W^j / W_{opt1}^j, \quad (3.12)$$

$$x_4^j = W^j / W_{opt2}^j. \quad (3.13)$$

Функція впливу вологозабезпеченості посівів розглядається як сполучення двох функцій. Враховується функція впливу вологості ґрунту на продуктивність рослин (за даними про фактичні запаси вологи) і відношення сумарного випаровування посівів до випаровуваності з врахуванням експозиції і крутості схилів:

$$FW = \left(\gamma_{\phi}^j \cdot \frac{E^j}{E_0^j} \right)^{0,5}, \quad (3.14)$$

де FW – відносна вологозабезпеченість посівів, відн. од.

Аналогічно визначається узагальнена функція впливу термічного режиму і вологозабезпеченості FTW_1 на фотосинтез:

$$FTW_1 = (\psi_{\phi} FW)^{0,5}. \quad (3.15)$$

До цієї функції вводиться корекція на рівень температури в сполученні

з вологозабезпеченістю

$$FTW_2 = \begin{cases} FTW_1[1 + (1 - \Psi_\Phi)(1 - FW)] & \text{при } t_n < t_{opt1} \\ FTW_1 & \text{при } t_{opt1} \leq t_n \leq t_{opt2} \\ FTW_1[1 - (1 - \Psi_\Phi)(1 - FW)] & \text{при } t_n > t_{opt2} \end{cases} . \quad (3.16)$$

3.1.4 Блок родючості ґрунту і забезпеченості рослин мінеральним живленням

Функція впливу вмісту гумусу у ґрунті визначається за формулою О.С. Образцова для розрахунку забезпеченості рослин елементами мінерального живлення

$$FW_{Gum} = (F_{Gum})^{1,35} \cdot \exp[1,1 \cdot (1 - F_{Gum})], \quad (3.17)$$

де FW_{Gum} – функція впливу вмісту гумусу у ґрунті на формування урожаю, відн. од.

Значення функцій оптимальності азотного, фосфорного і калійного живлення розраховується за методом О.С. Образцова з деякими модифікаціями

$$F_N = \frac{N_m}{N_{opt}}, \quad (3.18)$$

$$FW_N^j = \left\{ (F_N)^{1,35} \cdot \exp[1,1 \cdot (1 - F_N)] \right\} \cdot k_{ef}^j, \quad (3.19)$$

де N_m – внесена доза азотних добрив, кг/га;

N_{opt} – оптимальна доза азотних добрив, необхідна для одержання максимального урожаю, кг/га;

FW_N – функції впливу забезпеченості азотом, відн. од.;

k_{ef} – коефіцієнт ефективності добрив в залежності від вологості ґрунту,

відн. од.

Аналогічно визначаються функції впливу забезпеченості фосфором FW_P і калієм FW_K .

Вплив режиму зволоження ґрунту на ефективність добрив враховується за виразом:

$$k_{ef}^j = \begin{cases} 1 & \text{при } \frac{W^j}{W_{opt1}^j} \geq 0,85, \\ 0,8 & \text{при } 0,70 < \frac{W^j}{W_{opt1}^j} < 0,85, \\ 0,6 & \text{при } \frac{W^j}{W_{opt1}^j} \leq 0,70, \end{cases} \quad (3.20)$$

Аналогічно визначається співвідношення дози органічних добрив до їх оптимальної величини і розраховується функція впливу внесення органічних добрив з врахуванням року внесення добрив

$$F_{Org} = \frac{O_{rg}}{O_{rg\ opt}}, \quad (3.21)$$

$$FW_{Org}^j = \left\{ (F_{Org})^{1,35} \cdot \exp[1,1 \cdot (1 - F_{Org})] \right\} \cdot k_{Org}^g \cdot k_{ef}^j, \quad (3.22)$$

де FW_{Org} – функція впливу внесення органічних добрив на урожай;

O_{rg} – внесена доза органічних добрив, т/га;

$O_{rg\ opt}$ – оптимальна для вирощування сільськогосподарської культури

доза внесення органічних добрив, т/га;

k_{Org}^g – коефіцієнт впливу року внесення органічних добрив, відн. од.

Узагальнена функція впливу родючості ґрунту і внесення мінеральних та органічних добрив розраховується за принципом Лібіха

$$FWM_{ef}^j = \min\{FW_{Org}^j, FW_N^j, FW_P^j, FW_K^j\}, \quad (3.23)$$

де FWM_{ef} – функція впливу ефективної родючості на урожай, відн. од.

3.2.5 Блок агроекологічних категорій урожайності

Потенційна урожайність (ПУ) теоретично може бути отримана на високородючих ґрунтах, за оптимального рівня агротехніки та ідеальних погодних умов.

Прирости ПУ загальної біомаси за декаду визначається в залежності від інтенсивності фотосинтетично активної радіації (ФАР) і біологічних особливостей культури з врахуванням впливу на інтенсивність фотосинтезу посадок віку рослин

$$\frac{\Delta ПУ^j}{\Delta t} = \alpha_\phi^j \frac{\eta \cdot Q_{\text{фар}}^j \cdot d\nu^j}{q}, \quad (3.24)$$

де $\frac{\Delta ПУ}{\Delta t}$ – приріст потенційної урожайності загальної біомаси за декаду, г/м²;

α_ϕ – онтогенетична крива фотосинтезу, відн. од.;

η – КПД посівів, відн. од.;

$Q_{\text{фар}}$ – середньодекадна за добу сума ФАР, кал/см² доба;

q – калорійність.

Метеорологічно можлива урожайність (ММУ) – це максимальна урожайність, яка досягається в конкретних погодних умовах на високородючих ґрунтах за оптимального рівня складових технології вирощування. Приріст ММУ визначається в залежності від ПУ за рівнянням:

$$\frac{\Delta ММУ^j}{\Delta t} = \frac{\Delta ПУ^j}{\Delta t} \cdot FTW_2, \quad (3.25)$$

де $\frac{\Delta MMY}{\Delta t}$ – приріст метеорологічно-можливої урожайності загальної

біомаси за декаду, г/м²;

FTW_2 – узагальнена функція впливу волого-температурного режиму, відн. од.

Дійсно-можлива урожайність (ДМУ) – це урожайність, яка може бути досягнута на конкретному полі в конкретних погодних умовах з врахуванням реальної родючості ґрунту:

$$\frac{\Delta ДМУ^j}{\Delta t} = \frac{\Delta MMY^j}{\Delta t} B_{nl} F_{Gum}, \quad (3.26)$$

де $\frac{\Delta ДМУ}{\Delta t}$ – приріст дійсно можливої урожайності загальної біомаси за

декаду, г/м²;

B_{nl} – бал ґрунтового бонітету, відн. од.

Рівень господарської урожайності загальної біомаси обмежується реально існуючим рівнем культури землеробства й ефективністю внесених мінеральних і органічних добрив:

$$\frac{\Delta УВ^j}{\Delta t} = \frac{\Delta ДМУ^j}{\Delta t} k_{земл} FWM_{ef}^j, \quad (3.27)$$

де $\frac{\Delta УВ}{\Delta t}$ – приріст урожайності загальної біомаси у виробництві, г/м²;

$k_{земл}$ – коефіцієнт, що характеризує рівень культури землеробства і господарської діяльності, відн. од.;

FWM_{ef} – функція ефективності внесення органічних і мінеральних добрив в залежності від умов вологозабезпеченості декад вегетації, відн. од.

3.2.6 Блок узагальнених оціночних характеристик

Аналіз різноманітних агроєкологічних категорій врожайності (*ПУ*, *ММУ*, *ДМУ*, *УВ*), а також їхніх співвідношень і відмінностей дозволяє судити про природні й антропогенні ресурси сільського господарства, а також про ефективність господарського використання цих ресурсів стосовно вирощування сільськогосподарських культур.

Розглянемо п'ять узагальнених характеристик:

1. Ступінь сприятливості метеорологічних умов вирощування культури міскантусу характеризує співвідношення метеорологічно-можливої урожайності і потенційної урожайності його загальної надземної маси (стебел та листя)

$$K_m = ММУ/ПУ, \quad (3.28)$$

де K_m – коефіцієнт сприятливості метеорологічних умов, відн. од.

2. Сприятливість ґрунтових умов показує відношення дійсно можливої урожайності до метеорологічно-можливої урожайності

$$K_2 = ДМУ/ММУ, \quad (3.29)$$

де K_2 – коефіцієнт сприятливості ґрунтових умов, відн. од.

3. Співвідношення урожайності у виробництві і метеорологічно можливої урожайності встановлює ефективність використання агрокліматичних ресурсів. Якщо це співвідношення розраховується за середніми багаторічними даними, то воно відображає ефективність використання агрокліматичних ресурсів

$$K_{акл} = УВ/ММУ, \quad (3.30)$$

де $K_{акл}$ – коефіцієнт ефективності використання агрокліматичних ресурсів, відн. од.

4. При реальних ґрунтових умовах співвідношення урожайності у виробництві і дійсно можливої урожайності можна розглядати як показник досконалої агротехнології

$$K_{земл} = UB/ДМУ, \quad (3.31)$$

де $K_{земл}$ – коефіцієнт ефективності використання існуючих агрометеорологічних і ґрунтових умов (характеризує рівень культури землеробства з погляду ефективності господарського використання існуючого комплексу агрометеорологічних і ґрунтових умов), відн. од.

5. Величина відношення урожайності у виробництві до потенційної урожайності характеризує рівень реалізації агроекологічного потенціалу

$$K_{аек.пот} = UB/ПУ, \quad (3.32)$$

де $K_{аек.пот}$ – коефіцієнт реалізації агроекологічного потенціалу, відн. од.

Підвищення рівня UB і доведення його до $ДМУ$ вимагає ретельного дотримання всіх засобів агротехніки, виконання їх у повній відповідності з агрометеорологічними умовами на конкретному полі. Це є першочерговою задачею програмування урожаїв, спрямованого на усунення дії різноманітних господарських факторів, які знаходяться у мінімумі.

Наближення $ДМУ$ до $ММУ$ вимагає виконання різноманітних заходів для підвищення родючості ґрунту. Різниця між $ММУ$ і $ПУ$ компенсується за рахунок меліоративних заходів, а також внаслідок правильного підбору сортів і культур, що краще пристосовані до особливостей конкретного клімату. Підвищення рівня $ПУ$ забезпечується головним чином шляхом селекції нових сортів, які будуть мати більш високий рівень урожайності за рахунок ефективного використання сонячної радіації.

Формули (4.1)–(4.32) дозволяють визначити основні агроекологічні категорії урожайності сільськогосподарських культур, що формуються під впливом ґрунтово-кліматичних умов та виконати для цих територій оцінку агрокліматичних ресурсів формування продуктивності сільськогосподарських культур, зокрема тополі енергетичної.

3.3 Агрокліматичні показники вегетаційного періоду за умов реалізації сценарію RCP4.5

У таблиці 3.1 представлені основні агрокліматичні показники вегетаційного періоду тополі для території Лісостепу України. Розрахунки виконувались на прикладі Вінницької області. Дослідження впливу змін клімату на агрокліматичні умови вирощування та урожайність проводилися шляхом порівняння показників за базових умов (період 1986-2005 рр.) та за умов реалізації сценарію зміни клімату RCP4.5 на період 2021-2050 рр.

Відновлення вегетації плантацій тополі на території Лісостепу відбувається за базовими умовами 22 квітня. За умов реалізації сценарію зміни клімату RCP4.5 відновлення вегетації тополі у Лісостепу почнеться 29 квітня, тобто на тиждень пізніше ніж за базових умов. Закінчується вегетаційний період тополі за базових умов у другій половині першої декади жовтня (7.10), а за умов реалізації сценарію – на початку цієї ж декади (1.10), тобто за умов реалізації сценарію вегетаційний період тополі дещо скорочується (на один тиждень).

Оскільки продукційний процес будь-якої рослини залежить перш за все від тепла та вологи, представляє інтерес порівняння середньодекадних температур повітря та декадних сум опадів за базових та сценарних умов.

На рис. 3.1 надається порівняння ходу температури повітря та сум опадів протягом вегетаційного періоду тополі за базовими даними та за даними за сценарієм RCP4.5. Можна бачити, що за базових умов вегетаційний період тополі триває 17 декад, а за сценарних – 16 декад. Також можна бачити, що

перші вісім тижнів вегетаційного періоду тополі за обох варіантів хід температурних кривих практично паралельний, причому базові температури дещо перевищують сценарні – не більш ніж на 2,4°C. У дев'яту декаду температури практично співпадають, і подальший хід температур базових і сценарних також майже співпадає.

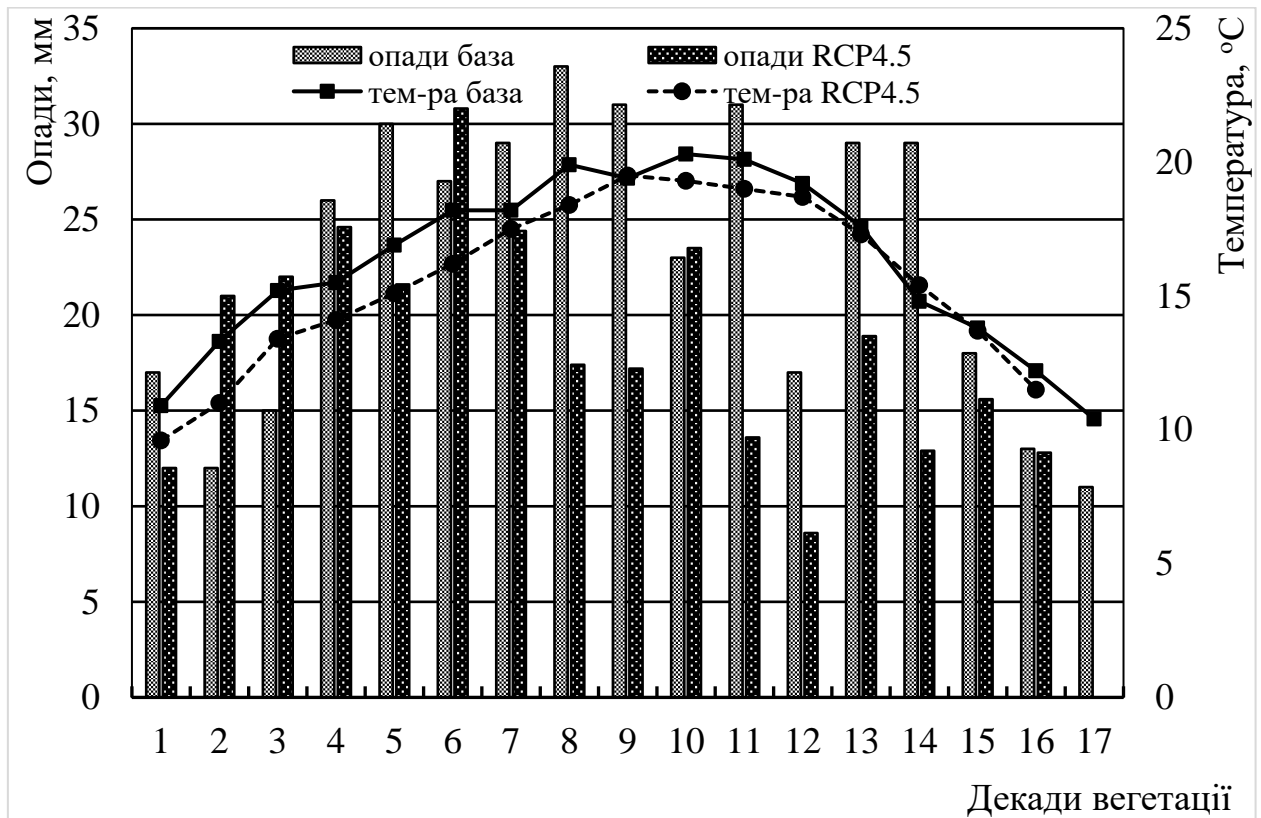


Рисунок 3.1 – Динаміка температур повітря та опадів за сценарієм RCP4.5 у порівнянні з базовим варіантом

Середня температура вегетаційного періоду тополі за базових умов становить 16,7°C, за сценарних – 15,8°C, тобто на 0,9°C вище.

Стосовно опадів за вегетаційний період тополі, можна сказати, що протягом майже всього вегетаційного періоду сценарні суми суттєво перевищували базові. Особливо чітко це видно наприкінці вегетаційного періоду, коли чотири декади поспіль (одинадцята-чотирнадцята декади) перевищення було практично у два рази. Лише у декількох декадах

Таблиця 3.1 – Агрокліматичні умови вегетації тополі у Лісостепу в порівнянні з умовами за сценарієм RCP4.5 зміни клімату

Період, сценарій	Дата відновлення вегетації	Середня температура повітря за період, °С	Сума опадів за період, мм	Сумарне випаровування за період (E _Ф), мм	Випаровуваність за період, (E _о), мм	Відносна вологозабезпеченість (E _Ф /E _о), %	Середній за період ГТК, відн. од.	Сума ФАР, кДж/см ² за період
Базовий	22.04	16,7	394	400	557	70	1,39	152,1
RCP4.5	29.04	15,8	285	317	474	64	1,16	152,9
Різниця	7	-0,9	-109	-83	-83	-6	-0,23	0,8
Різниця, %			-28	-21	-15			1

спостерігалась протилежна ситуація, коли сценарна сума опадів була вища за базову.

Як вже було сказано, за сценарним варіантом очікується невелике зменшення тривалості вегетаційного періоду тополі. На рис. 3.1. можна бачити, що друга половина вегетаційного періоду у цьому випадку проходить на фоні досить суттєвого зменшення кількості опадів. За весь вегетаційний період тополі базова сума опадів становить 394 мм, сценарне значення на 109 мм менше і становить 285 мм. У відсотковому відношенні це зменшення становитиме 28%.

Базова величина сумарного випаровування (E_{ϕ}) плантацій тополі становить 400 мм, базове значення вологопотребності (E_o) становить 557 мм. Базове значення дефіциту вологи (різниця випаровуваності E_o та випаровування E_{ϕ}) становить 157 мм. За умов реалізації сценарію RCP4.5, завдяки зменшенню кількості опадів, фактичне вологоспоживання плантацій також зменшиться на 83 мм і становитиме 317 мм.

Також за сценарних умов відбудеться і зменшення величини випаровуваності (E_o) до 474 мм. У порівнянні із базовим значенням це зменшення також становить 83 мм, а сценарний дефіцит вологи протягом вегетації становитиме також 157 мм (тобто величини дефіциту не зміняться).

За сценарних умов зменшиться і сценарна величина вологозабезпеченості вегетаційного періоду. Вона становитиме 64% проти 70% базових. Також за рахунок сценарного зменшення кількості опадів зменшиться величина ГТК: з базової 1,39 до сценарної 1,16 відн. од.

Прихід ФАР за вегетаційний період за базовими даними складає 152,1 кДж/см² (табл. 3.1). За сценарієм RCP4.5 прихід ФАР очікується практично рівний базовому – 152,9 кДж/см², що всього на 0,8 кДж/см² більше.

3.4 Агрокліматичні показники вегетаційного періоду за умов реалізації сценарію RCP6.0

Агрокліматичні умови вегетації тополі за умов реалізації сценарію RCP6.0 надаються у табл. 3.2. Також на рис. 3.2 надаються графіки ходу сценарних та базових температур та сум опадів. На відміну від попереднього варіанту можна бачити, що за цим сценарієм початок вегетації енергоплантацій очікується раніше за базову дату, причому різниця є досить суттєвою і становить 10 днів. Тобто сценарне відновлення вегетації очікується 12 квітня. Закінчення вегетаційного періоду за цим сценарієм очікується на 11 днів пізніше – 18 жовтня (проти базової дати 7 жовтня). Таким чином, за умов реалізації сценарію RCP6.0 тривалість вегетаційного періоду тополі збільшиться на два тижні.

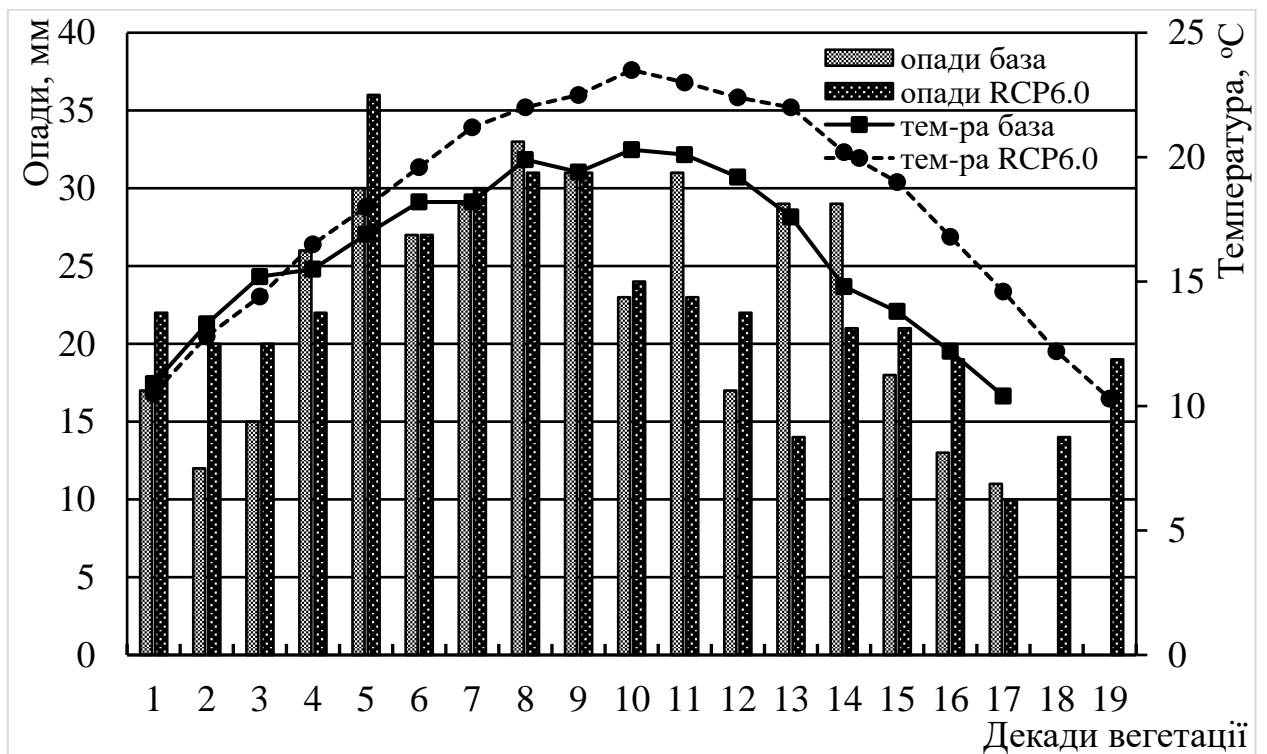


Рисунок 3.2 – Динаміка температур повітря та опадів за сценарієм RCP6.0 у порівнянні з базовим варіантом

Таблиця 3.2 – Агрометеорологічні умови вегетації тополі у Лісостепу в порівнянні з умовами за сценарієм RCP6.0 зміни клімату

Період, сценарій	Дата відновлення вегетації	Середня температура повітря за період, °C	Сума опадів за період, мм	Сумарне випарову- вання за період (E _ф), мм	Випарову- ваність за період, (E _о), мм	Відносна вологоза- безпеченість (E _ф /E _о), %	Середній за період ГТК, відн. од.	Сума ФАР, кДж/см ² за період
Базовий	22.04	16,7	394	400	557	70	1,39	152,1
RCP6.0	12.04	18,0	427	530	801	66	1,23	169,9
Різниця	-10	1,3	33	130	244	-4	-0,16	17,8
Різниця, %			8	33	44		-12	12

За базовим варіантом сума температур за вегетацію тополі становить 2812°C, за сценарієм RCP6.0 - відповідно 3474°C, тобто на 662°C (24%) більше. Це доволі істотне перевищення суми температур пояснюється, по-перше, подовженням сценарного вегетаційного періоду на два тижні, а по-друге – набагато вищими значеннями сценарних температур протягом всього періоду. Це можна бачити і на рис. 3.2. На початку вегетації, з першої по шосту декади обидві температури є майже однаковими, але, починаючи з сьомої декади можна чітко бачити, що сценарна температура суттєво перевищує базову. Особливо це видно наприкінці вегетації плантацій, коли протягом 13-16 декад вегетації різниця температур сягає 4,5-5,5°C.

Дещо більше опадів за вегетацію очікується також за умов реалізації сценарію RCP6.0. Сценарне значення на 33 мм (8%) перевищує базове і становить 427 мм (проти базових 394 мм). Як можна бачити з рисунка, таке досить невелике збільшення можна віднести за рахунок подовження періоду вегетації, коли як раз за останні дві декади за сценарієм випадає 33 мм опадів. Також можна бачити, що протягом вегетації у половині досліджених декад сценарні опади перевищували базові і навпаки. Наприклад, протягом 11, 13 та 14 декад – базові опади були більше на 8-15 мм відповідно, тоді як на початку вегетації у 1-3 декадах сценарні суми опадів є дещо більшими за базові - на 5-8 мм. Причому, у середині вегетації (6-10 декади) сценарні і базові значення були практично однаковими. У цілому можна сказати, що значення кількості опадів протягом вегетації за обома варіантами є досить стабільними.

Базова величина сумарного випаровування (E_{ϕ}) плантацій тополі становить 400 мм, базове значення вологопотреби (E_o) становить 557 мм. Базове значення дефіциту вологи (різниця випаровуваності E_o та випаровування E_{ϕ}) становить 157 мм. За умов реалізації сценарію RCP6.0 фактичне вологоспоживання плантацій збільшиться на 130 мм (33%) і становитиме 530 мм.

Також за сценарних умов відбудеться і збільшення величини випаровуваності (E_o) до 801 мм, тобто на 244 мм або 44%. У порівнянні із

базовим значенням сценарний дефіцит вологи протягом вегетації становитиме 271 мм (тобто величина дефіциту збільшиться на 114 мм або 73%).

За сценарних умов зменшиться і сценарна величина вологозабезпеченості вегетаційного періоду. Вона становитиме 66% проти 70% базових. Також за рахунок сценарного зменшення кількості опадів зменшиться величина ГТК: з базової 1,39 до сценарної 1,23 відн. од.

Значення сум ФАР у посадках тополі протягом вегетаційного періоду за базовими умовами становить 152,2 кДж/см², а за сценарними умовами становитиме 169,9 кДж/см² тобто на 17,8 кДж/см² (12 %) більше.

3.5 Агрокліматичні показники вегетаційного періоду за умов реалізації сценарію RCP8.5

Графіки ходу сценарних та базових температур та сум опадів представлені на рис. 3.3. Агрокліматичні умови вегетації тополі за умов реалізації сценарію RCP8.5 представлені у табл. 3.3. Можна бачити, що за цим сценарієм початок вегетації енергоплантацій практично співпадає з базовою датою і очікується 24.04 (проти 22.04). Закінчення вегетаційного періоду за цим сценарієм очікується 5 жовтня, на 2 дні раніше базової дати. Таким чином, за умов реалізації сценарію RCP8.5 тривалість вегетаційного періоду тополі буде близькою до базової.

З рис. 3.3 можна бачити, що протягом другої – восьмої декад вегетаційного періоду базові температури, що спостерігаються, дещо перевищують сценарні, але це перевищення є не більшим за 2°C. У дев'яту декаду сценарні і базові температури дорівнюють одна одній і, починаючи з десятої декади, ці дві температурні криві майже співпадають. Середня температура вегетаційного періоду тополі становить за базовими умовами 16,7°C, а за сценарними вона очікується усього на 0,9°C нижче – 15,8°C.

Стосовно декадних сум опадів за декаду можна з рис. 3.4 зробити висновок, що за умов реалізації сценарію RCP8.5 у більшості досліджуваних

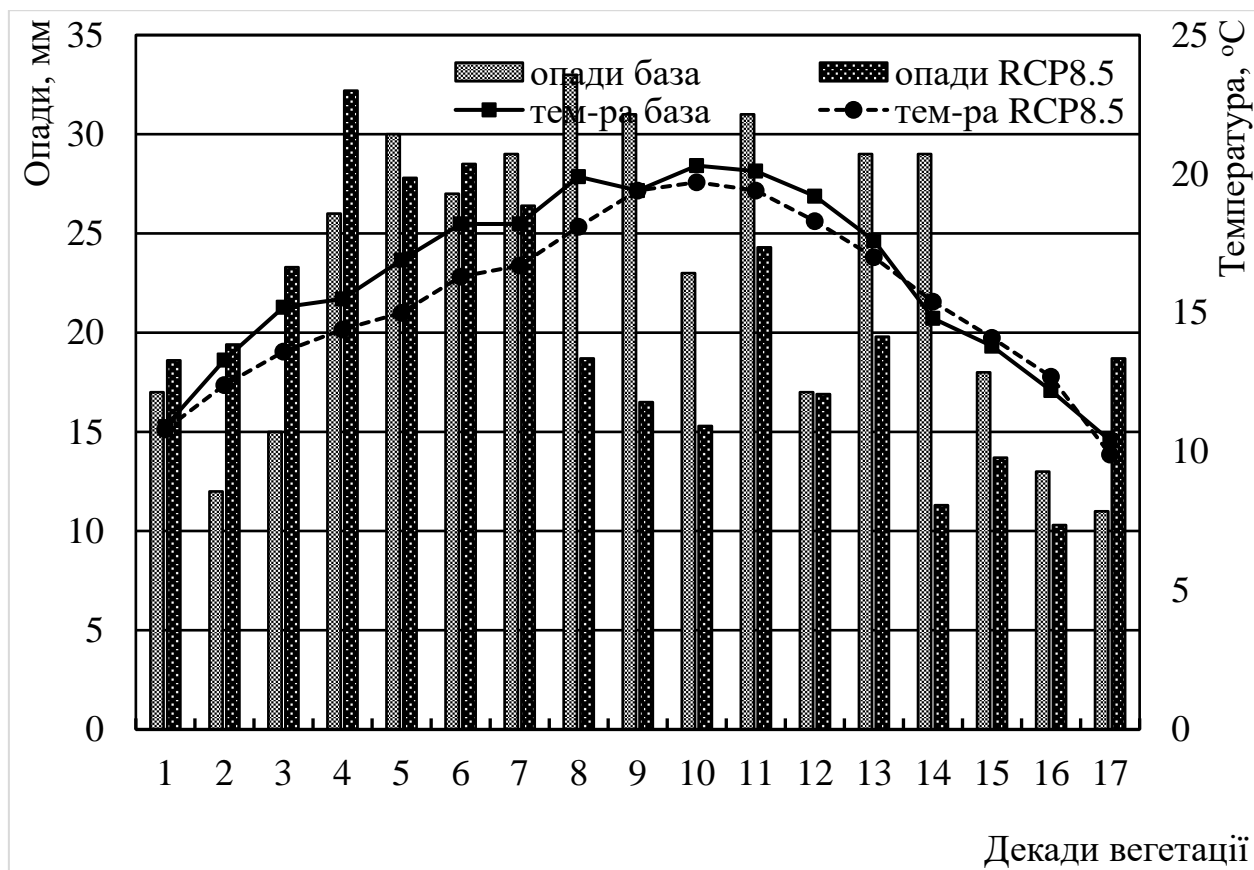


Рисунок 3.5 – Динаміка температур повітря та опадів за сценарієм RCP8.5 у порівнянні з базовим варіантом

декад вегетації базові опади перевищують сценарні. Причому у 8, 9 та 14 декади це перевищення може бути досить суттєвим і становити 14,5-17,7 мм. Лише на початку та наприкінці вегетації (друга-третья та сімнадцята декади) сценарні суми опадів дещо перевищують, але не більше ніж на 7-8 мм.

Базова кількість опадів становить 394 мм, тоді як сценарна – 323 мм. Таким чином, значення кількості опадів протягом вегетації за обома варіантами відрізняються на 71 мм, що становить 18%.

Як і у випадку реалізації сценарію RCP6.0, за сценарієм RCP8.5 величина E_f за сценарними умовами також зменшиться – на 52 мм (13%) у порівнянні з базовою, значення кількості опадів протягом вегетації за обома варіантами відрізняються на 71 мм, що становить 18%.

Таблиця 3.4 – Агrometeorологічні умови вегетації тополі у Лісостепу в порівнянні з умовами за сценарієм RCP8.5 зміни клімату

Період, сценарій	Дата відновлення вегетації	Середня температура повітря за період, °C	Сума опадів за період, мм	Сумарне випаровування за період (E _ф), мм	Випаровуваність за період, (E _о), мм	Відносна вологозабезпеченість (E _ф /E _о), %	Середній за період ГТК, відн. од.	Сума ФАР, кДж/см ² за період
Базовий	22.04	16,7	394	400	557	70	1,39	152,1
RCP8.5	24.04	15,8	323	348	499	70	1,25	163,9
Різниця	2	-0,9	-71	-52	-58	0	-0,14	11,8
Різниця, %		5	-18	-13	-10		-11	-8

Величина E_o протягом вегетації за рахунок невеликого зменшення температурного фону за умов сценарію RCP8.5 також дещо зменшиться і становитиме 499 мм проти базових 557 мм. Це зменшення становить 58 мм або 10%. Зовсім несуттєво зміниться дефіцит вологи протягом вегетації. Він становитиме 151 мм замість 157 мм (тобто збільшення дефіциту становитиме відповідно лише 6 мм або 4%). Оскільки і випаровування (E_f) і випаровуваність (E_o) у разі реалізації сценарію RCP8.5 змінюються практично однаково, то показник вологозабезпеченості енергоплантацій тополі не зміниться.

Вологозабезпеченість вегетаційного періоду культури (E_f/E_o) у сценарних умовах становитиме 70%, така ж величина спостерігається і за базових умов. За сценарієм RCP8.5 дещо збільшиться посушливість протягом вегетаційного періоду. Величина сценарного ГТК становитиме 1,25 на відміну від базової 1,39. Значення сум ФАР у посадках тополі протягом вегетаційного періоду за базовими умовами становить 152,1 кДж/см², а за сценарними збільшиться на 11,8 кДж/см² і становитиме порядку 163,9 кДж/см².

У цілому можна сказати, що за умов реалізації всіх сценаріїв умови зростання енергетичної тополі суттєво в Лісостепу не зміняться, тож не слід очікувати суттєвого зменшення продуктивності плантацій. А з врахуванням того, що енергетична тополя уже з другого року вегетації формує потужну кореневу систему, що глибоко проникає у ґрунт, можна сподіватися, що невелике погіршення умов зволоження не вплине суттєво на урожайність. Також слід пам'ятати, що при розробці сценаріїв зміни клімату фахівці враховують збільшення концентрації CO₂ в атмосфері, а саме вуглекислий газ, як відомо, є тою самою неорганічною речовиною, яку рослини (разом з водяною паром) використовують у процесі фотосинтезу при створенні органічної речовин. Ці обставини також можуть позитивно вплинути на формування майбутніх урожаїв.

4 ВПЛИВ ЗМІН КЛІМАТУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ЕНЕРГОПЛАНТАЦІЙ ТОПОЛІ

4.1 Вплив змін клімату за сценарієм RCP4.5 на формування урожаїв тополі різних агроecологічних категорій

Як вже відзначалося вище, в даній роботі ми розглядали три агроecологічних категорії урожаїв – потенційний урожай (ПУ), метеорологічно можливий урожай (ММУ) і дійсно-можливий урожай (ДМУ). Крім того ми визначали величину фактичного виробничого урожаю (УВ) деревини тополі.

Оскільки урожайність будь-якої культури визначається фотосинтетичною здатністю її посівів або посадок. Показниками цього є площа листової поверхні посіву, величина фотосинтетичного потенціалу посівів (ФСП), прирости урожаїв різних агроecологічних категорій. Зміни показників фотосинтетичної продуктивності спричиняє відповідну зміну урожаїв.

Потенціальний урожай визначається величиною ФАР, тому для визначення впливу змін клімату на режим ФАР і відповідно на прирости величин сухої біомаси ПУ сухої біомаси нами було побудовано графік динаміки середньодекадних приростів і декадних сум ФАР (рис. 4.1). Оскільки з рисунку видно, що сценарні значення сум ФАР дещо перевищують базові, тому і сценарні прирости також перевищують базові значення.

Так, на початку вегетаційного періоду тополі базова сума ФАР становить 190 ккал/см² добу, а сценарна – 240 ккал/см² добу. У наступні три декади ці суми збільшуються, причому збільшення базової суми ФАР відбувається дуже активно і у четверту декаду вегетації вона уже досягає значення 248 ккал/см² добу. Тоді як сценарна сума ФАР за цей період збільшується лише до 256 ккал/см² добу. Досягає свого максимуму ФАР за

обома варіантами у дев'яту декаду вегетації, складаючи величини 252 і 285 ккал/см²добу відповідно. Після цього до кінця періоду вегетації плантації тополі спостерігається поступове зменшення величин сум ФАР до 103 ккал/см²добу за базовим варіантом і до 143 ккал/см²добу за умов реалізації сценарію RCP4.5.

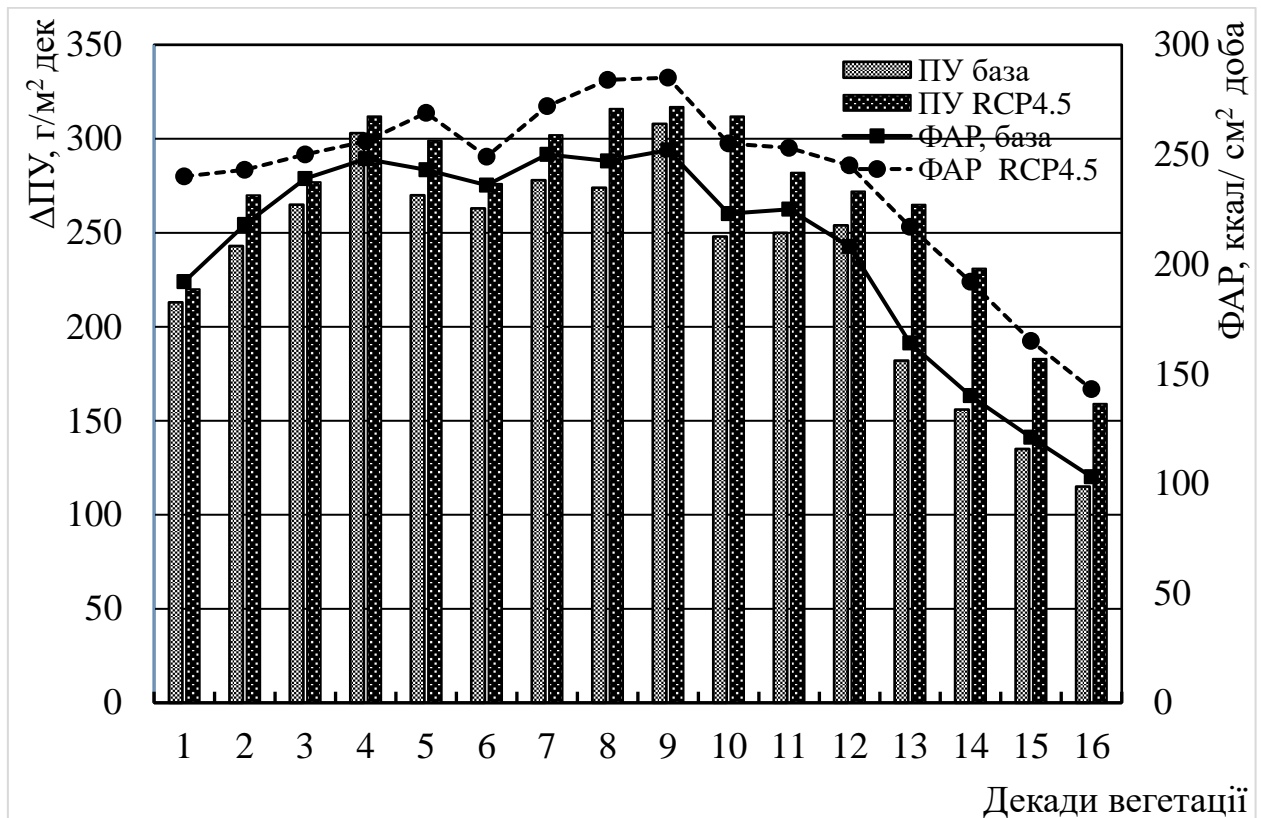


Рисунок 4.1 - Динаміка декадних приростів ПУ тополі та сум ФАР в умовах Лісостепу за сценарієм RCP4.5 у порівнянні з базовим періодом

У відповідності до динаміки сум ФАР відбувається хід декадних приростів ПУ. Приріст ПУ в першій декаді вегетації, як можна бачити на рис. 4.1, становить 213 г/м² дек за базовим варіантом і 220 г/м² дек - за сценарним. Найбільші перевищення приростів ПУ за сценарним варіантом над базовими спостерігається наприкінці вегетації, коли, наприклад, у чотирнадцяту декаду ΔПУ за базовим варіантом становить 156 г/м² дек, а за сценарним – 231 г/м² дек, тобто майже на 50% більше.

На рисунку 4.2 представлена динаміка накопичення листової площі енергоплантацій за умов реалізації сценарію RCP4.5 у порівнянні з базовими умовами. Можна бачити, що зростання площі відбувається до кінця липня, а потім до кінця вегетації площа листя зменшується. Динаміка сценарного накопичення площі листя практично аналогічна базовій, але максимальне значення площі листя за базовий період становить $4,9 \text{ м}^2/\text{м}^2$, а за сценарним варіантом дещо більше – $5,15 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

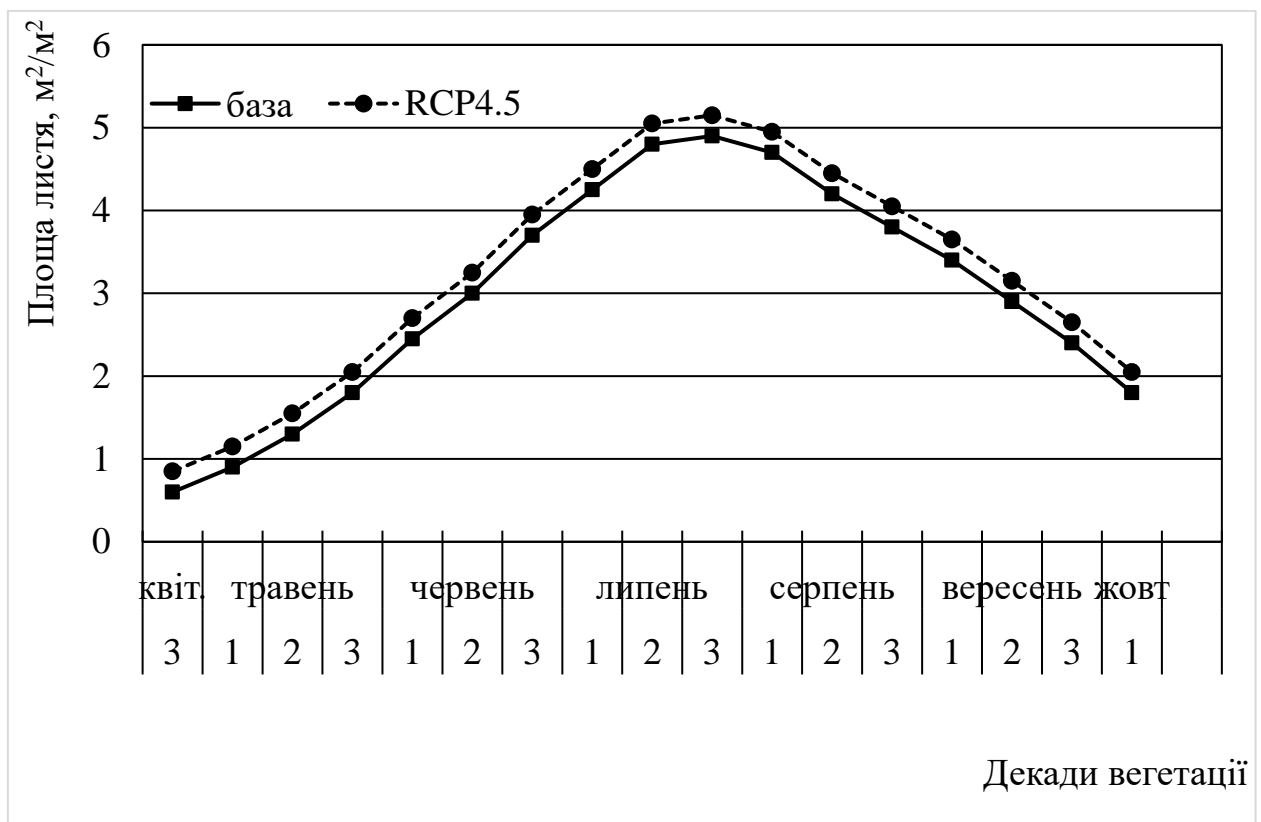


Рисунок 4.2 - Динаміка накопичення відносної площі листя за сценарієм RCP4.5 у порівнянні з базовими умовами

Основні показники фотосинтетичної продуктивності енергоплантацій тополі представлені у таблиці 4.1. Як вже відзначалося, суми ФАР за сценарний період майже не перевищують базові. Тому можна бачити, що сценарне значення ПУ практично дорівнює базовому. Значення становлять відповідно 403 і 406 ц/га, різниця -лише 3 ц/га або 1%.

Таблиця 4.1 – Показники продуктивності енергоплантацій тополі за сценарієм RCP4.5 у порівнянні з базовими умовами

Період, сценарій	Загальна суха маса, ц/га			Фотосинтетичний потенціал, м ² /м ² за період	Урожай при 20% вологості, ц/га
	потенційного урожаю	метеорологічно можливого урожаю	дійсно можливого урожаю		
Базовий	403	210	145	509	122
RCP4.5	406	240	165	567	138
Різниця	3	30	20	58	16
Різниця, %	1	14	14	11	13

Не дивлячись на те, що значення вологозабезпеченості вегетаційного періоду тополі за базових умов дещо більше, ніж за сценарієм RCP4.5, сценарна величина величина ММУ перевищує базову. Це можна пояснити тим, що тополя, як деревна рослина, розвиває дуже потужну і глибоко проникаючу у ґрунт кореневу систему. Тому зі зменшенням запасів продуктивної вологи, яке спричиняється зменшенням суми опадів за сценарний період, рослини тополі успішно справляються. А дещо менші температури протягом вегетаційного періоду за сценарними умовами сприяють накопиченню маси деревини. Як вже відмічалось, оптимальною температурою для зростання тополі є 14°C. Тому умови, що очікуються за сценарієм RCP4.5 спричиняють зростання ММУ плантації до 240 ц/га, тобто на 30 ц'га більше за базове значення (210 ц/га). У відсотках це становить 14%.

Оскільки ДМУ визначається перш за все балом ґрунтового бонітету, а він і для базового і для сценарного варіанту нами був вибраний однаковий – 0,69, то величина сценарного ДМУ також буде перевищувати базове значення. Так, базовий ДМУ деревини становить 145 ц/га, а сценарний становитиме 165 ц/га, що на 20 ц/га чи на 14% більше.

Завдяки дещо більшій площі листя плантації сценарне значення фотосинтетичного потенціалу також буде більшим і становитиме 567 м²/м² за вегетаційний період проти базового значення 509 м²/м². Різниця становить 58 м²/м² чи 11%. Зміни показників фотосинтетичної продуктивності спричиняють

зміну фактичного урожаю сухої біомаси деревини тополі. За базових умов він становить 122 ц/га, а за сценарних – 138 ц/га. Це на 16 ц/га, або на 13% більше.

У цілому можна сказати, що, не дивлячись на деяке зменшення показника вологозабезпеченості посадок протягом вегетаційного періоду за умов реалізації сценарію RCP4.5, завдяки біологічним особливостям тополі очікується збільшення продуктивності енергоплантацій на території Лісостепу України.

4.2 Вплив змін клімату за сценарієм RCP6.0 на формування урожаїв тополі різних агроекологічних категорій

Оскільки потенційний урожай - це найбільш можливий урожай, який залежить від величини використаної фотосинтетичної активної радіації (ФАР), перш за все були проаналізовані графіки середньодекадних приростів ПУ та відповідні ряди значень сум ФАР за умов реалізації сценарію RCP6.0 (рис. 4.3). Протягом чотирьох початкових декад вегетаційного періоду тополі базові і сценарні суми ФАР мало відрізняються і зростають від 250 та 270 ккал/см²добу відповідно. Але протягом четвертої - сьомої декад значення сценарних сум різко зростає і в сьому декаду досягає свого максимального значення - 305 ккал/см² добу. У наступні дві-три декади сценарні суми ФАР починають поступово зменшуватися, але суттєве зменшення спостерігається вже після дев'ятої декади. У той же час, протягом всього періоду від четвертої до дев'ятої декади базові суми ФАР залишаються практично постійними на рівні 250 ккал/см² добу (несуттєве зниження до 236 ккал/см² добу спостерігається у шосту декаду). Тобто весь цей період суми ФАР сценарні є набагато вищими за базові. В 11-ту та 12-ту сценарні суми зрівнюються з базовими, сягаючи значень порядку 210-220 ккал/см²добу. Протягом останньої третини вегетаційного періоду тополі базові та сценарні значення сум ФАР є практично однаковими і в останню декаду вегетації становлять 103 та 86 ккал/см² добу відповідно.

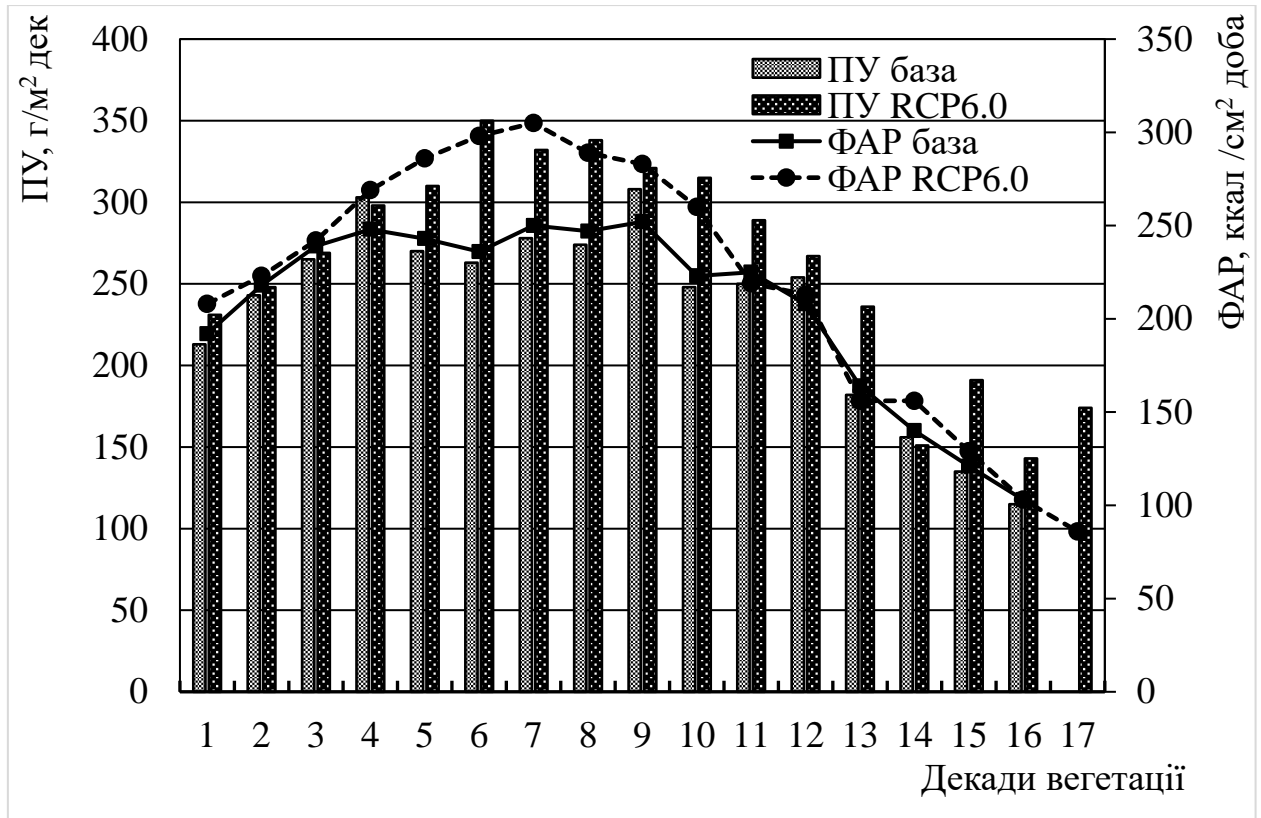


Рисунок 4.3 - Динаміка декадних приростів ПУ тополі та сум ФАР в умовах Лісостепу за сценарієм RCP6.0 у порівнянні з базовим періодом

У відповідності до динаміки сум ФАР відбувається хід декадних приростів ПУ. Базові і сценарні прирости ПУ в перші чотири декади вегетації, як можна бачити на рис. 4.3, є практично однаковими і різниця між ними становить лише 5-10 г/м² дек. Суттєві перевищення приростів ПУ за сценарним варіантом над базовими спостерігаються у сьому, восьму і десяту декади. Ці перевищення становлять відповідно 55, 42, та 37 г/м² дек. Найбільше перевищення приросту ΔПУ за умов реалізації сценарію RCP6.0 над базовим спостерігається у шостій декаді і становить 62 г/м² дек.

Хід накопичення площі асиміляційної поверхні плантацій представлено на рис. 4.4. Як і для попереднього випадку із сценарієм RCP4.5, за умов реалізації сценарію RCP6.0 хід базових і сценарних кривих практично однаковий, лише із зсуном у часі. Площа листя у момент максимального розвитку (третя декади липня) за базових умов становить 4,9 м²/м², а за

сценарних умов максимальної площі листя плантація досягає у другій декаді липня і вона становить $4,95 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

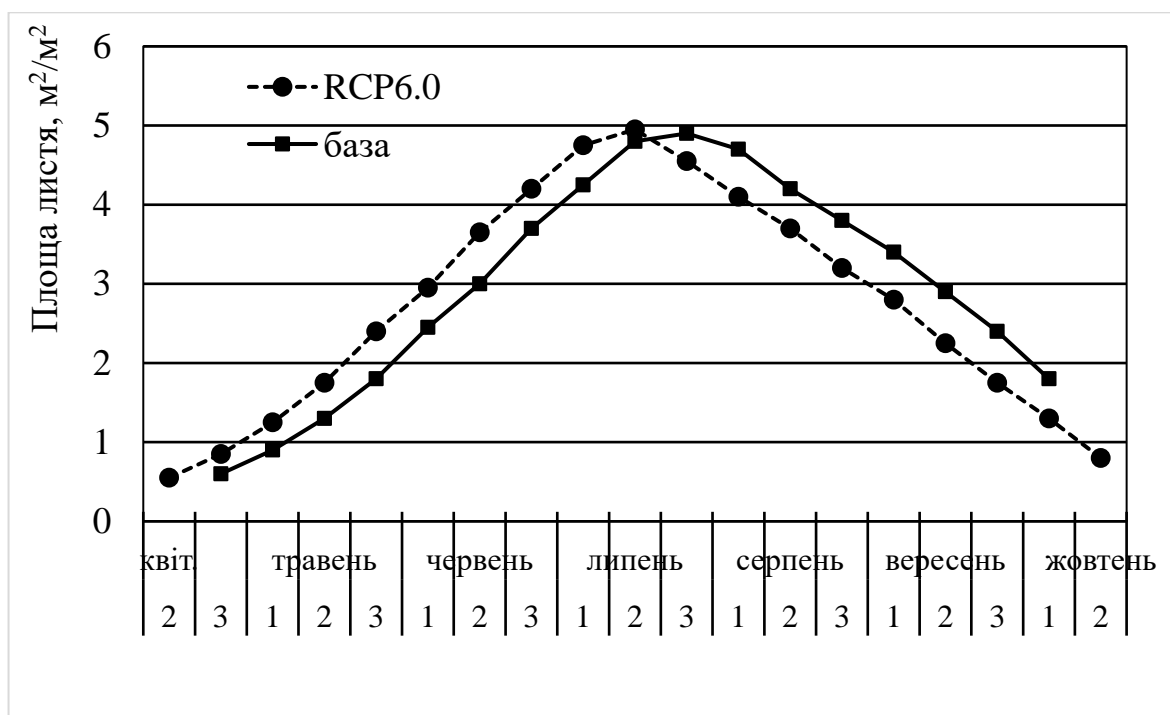


Рисунок 4.4 - Динаміка накопичення відносної площі листя за сценарієм RCP6.0 у порівнянні з базовими умовами

Основні показники фотосинтетичної продуктивності енергоплантацій тополі представлені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Показники продуктивності енергоплантацій тополі за сценарієм RCP6.0 у порівнянні з базовими умовами

Період, сценарій	Загальна суха маса, ц/га			Фотосинтетичний потенціал, $\text{м}^2/\text{м}^2$ за період	Урожай при 20% вологості, ц/га
	потенційного урожаю	метеорологічно можливого урожаю	дійсно можливого урожаю		
Базовий	403	210	145	509	122
RCP6.0	415	220	152	518	127
Різниця	12	10	7	9	5
Різниця, %	3	5	5	2	4

Як вже відзначалося, суми ФАР за сценарний період у цьому випадку дещо перевищують базові. Тому можна бачити, що сценарне значення ПУ також дещо вище за базове. Значення становлять відповідно 403 і 415 ц/га, різниця - 12 ц/га або 3%.

Як і за сценарієм RCP4.5, у випадку реалізації сценарію RCP6.0 значення вологозабезпеченості вегетаційного періоду тополі за базових умов дещо більше, ніж за сценарних. Але з описаних вище причин сценарне значення ММУ і в цьому випадку перевищує базове. Умови, що очікуються за сценарієм RCP6.0 спричиняють зростання ММУ плантації до 220 ц/га, тобто на 10 ц/га більше за базове значення (210 ц/га). У відсотках це становить 5%.

Оскільки ДМУ визначається перш за все балом ґрунтового бонітету, а він і для базового і для сценарного варіанту нами був вибраний однаковий – 0,69, то величина сценарного ДМУ також буде дещо перевищувати базове значення. Так, базовий ДМУ деревини становить 145 ц/га, а сценарний становитиме 152 ц/га, що на 7 ц/га чи на 5% більше.

Оскільки сценарне і базове значення максимальної площі листя практично однакові, лише за рахунок подовження сценарного вегетаційного періоду на 2 тижні, сценарний фотосинтетичний потенціал посадки тополі виявляється трохи більшим за базовий. Він становить 518 м²/м² за вегетаційний період проти базового значення 509 м²/м². Різниця становить 9 м²/м² чи 2%. Зміни показників фотосинтетичної продуктивності спричиняють зміну фактичного урожаю сухої біомаси деревини тополі. За базових умов він становить 122 ц/га, а за сценарних – 127 ц/га. Це на 5 ц/га, або на 4% більше.

У цілому можна сказати, що, і у випадку реалізації сценарію RCP6.0, не дивлячись на деяке зменшення показника вологозабезпеченості посадок протягом сценарного вегетаційного періоду, завдяки біологічним особливостям тополі очікується хоча і не суттєве, але збільшення продуктивності енергоплантацій на території Лісостепу України.

4.3 Вплив змін клімату за сценарієм RCP8.5 на формування урожаїв тополі різних агроєкологічних категорій

Ми розглядали три агроєкологічних категорії урожаїв – потенційний урожай (ПУ), метеорологічно можливий урожай (ММУ) і дійсно-можливий урожай (ДМУ) і за умов реалізації сценарію RCP8.5. Крім того ми визначали величину фактичного виробничого урожаю (УВ) деревини тополі і за цим сценарієм. Також були визначені площа листової поверхні посіву, величина фотосинтетичного потенціалу посівів (ФСП), прирости урожаїв різних агроєкологічних категорій. Зміни показників фотосинтетичної продуктивності спричиняють відповідну зміну урожаїв.

Потенціальний урожай визначається величиною ФАР, тому для визначення впливу змін клімату на режим ФАР і відповідно на прирости величин сухої біомаси ПУ сухої біомаси нами також було побудовано графік динаміки середньодекадних приростів і декадних сум ФАР (рис. 4.5). Оскільки з рисунку видно, що сценарні значення сум ФАР дещо перевищують базові, тому і сценарні прирости у більшості випадків також перевищують базові значення.

Так, на початку вегетаційного періоду тополі базова сума ФАР становить 190 ккал/см² добу, а за умов реалізації сценарію – 238 ккал/см² добу. Протягом наступних трьох декад базові суми збільшуються інтенсивніше і змінюються від 190 до 248 ккал/см² добу, тобто на 56 ккал/см² добу. Збільшення сценарних сум також відбувається, але тільки до третьої декади і лише на 11 ккал/см² добу (з 238 до 249 ккал/см² добу). У четвертій декаді навіть відбувається зменшення сум ФАР до 243 ккал/см² добу і базові суми наближаються за значенням до сценарних.

Потім протягом п'яти декад, як вже відзначалось, базові значення сум ФАР є досить стабільними (за виключенням одноразового зменшення до 236 ккал/см² добу у шосту декаду). Стосовно сценарних сум, протягом п'ятої – сьомої декад вони є майже незмінними – порядку 265 ккал/см² добу, а у

наступні три декади ці суми збільшуються до 283-276 ккал/см² добу, після чого відбувається досить різке зниження сум ФАР до кінця вегетації.

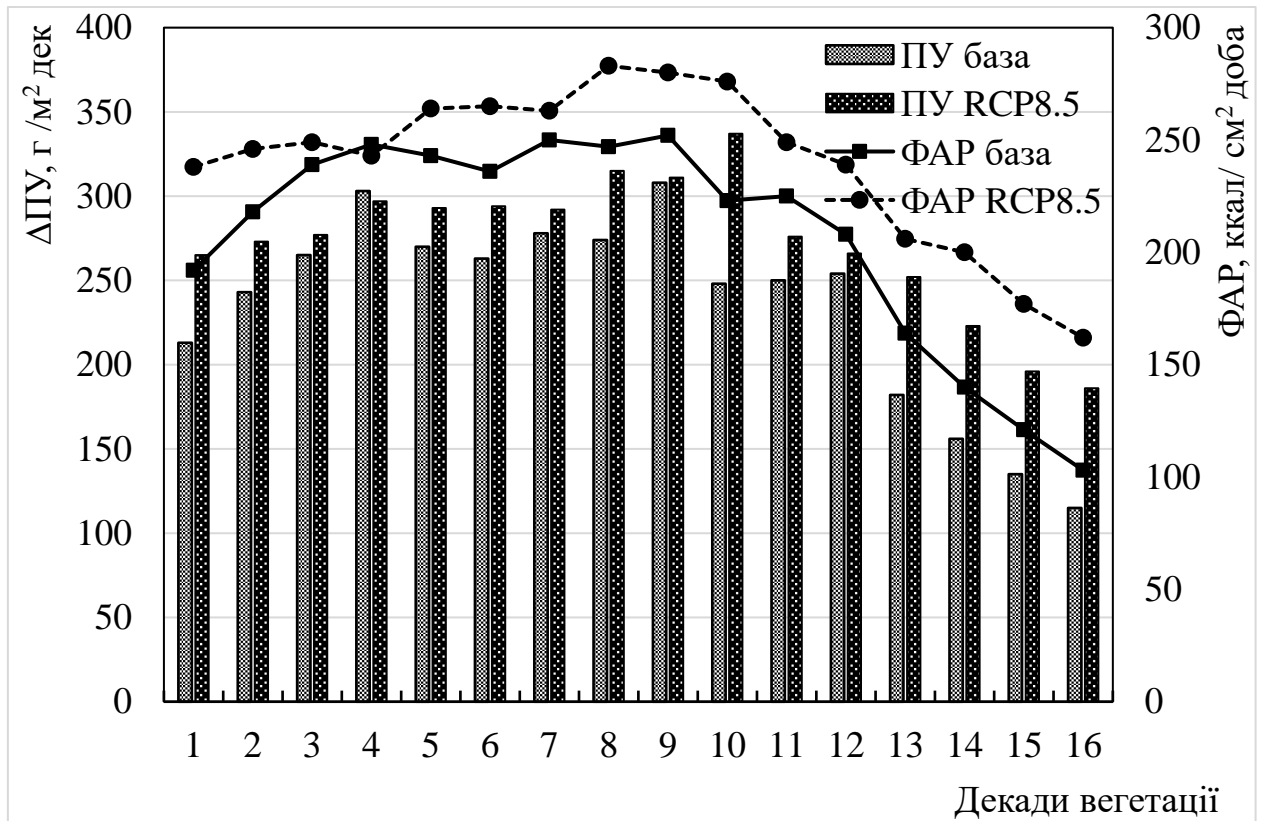


Рисунок 4.5 - Динаміка декадних приростів ПУ тополі та сум ФАР в умовах Лісостепу за сценарієм RCP8.5 у порівнянні з базовим періодом

Базові значення також зменшуються після дев'ятої декади, на цьому часовому відрізку криві сценарних та базових температур розташовуються майже паралельно, але базові значення є суттєво меншими за сценарні. Так, наприкінці періоду вегетації тополі базова сума ФАР становить лише 103 ккал/см² добу, тоді як сценарна, за умов реалізації сценарію RCP8.5 є більшою і становить 120 ккал/см² добу.

У відповідності до динаміки сум ФАР відбувається хід декадних приростів ПУ. Приріст ПУ в першій декаді вегетації, як можна бачити на рис. 4.5, становить 213 г/м² дек за базовим варіантом і 265 г/м² дек - за сценарним.

Практично протягом всього вегетаційного періоду тополі спостерігаються перевищення сценарних приростів над базовими. Найбільші перевищення приростів ПУ за сценарним варіантом над базовими спостерігаються у восьму, десяту та тринадцяту декаду: Δ ПУ між базовими та сценарними варіантами у ці декади становить відповідно 41, 89 та 70 $\text{г}/\text{м}^2$ дек.

Хід накопичення площі асиміляційної поверхні плантацій представлено на рис. 4.6. Можна бачити, що хід базових і сценарних кривих і у цьому випадку практично однаковий, але сценарні значення площі листя суттєво перевищують базові. Так, площа листя у момент максимального розвитку (третья декада липня) за сценарних умов становить $5,6 \text{ м}^2/\text{м}^2$ проти базового значення $4,9 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Основні показники фотосинтетичної продуктивності енергоплантацій тополі за сценарієм RCP8.5 представлені у таблиці 4.3.

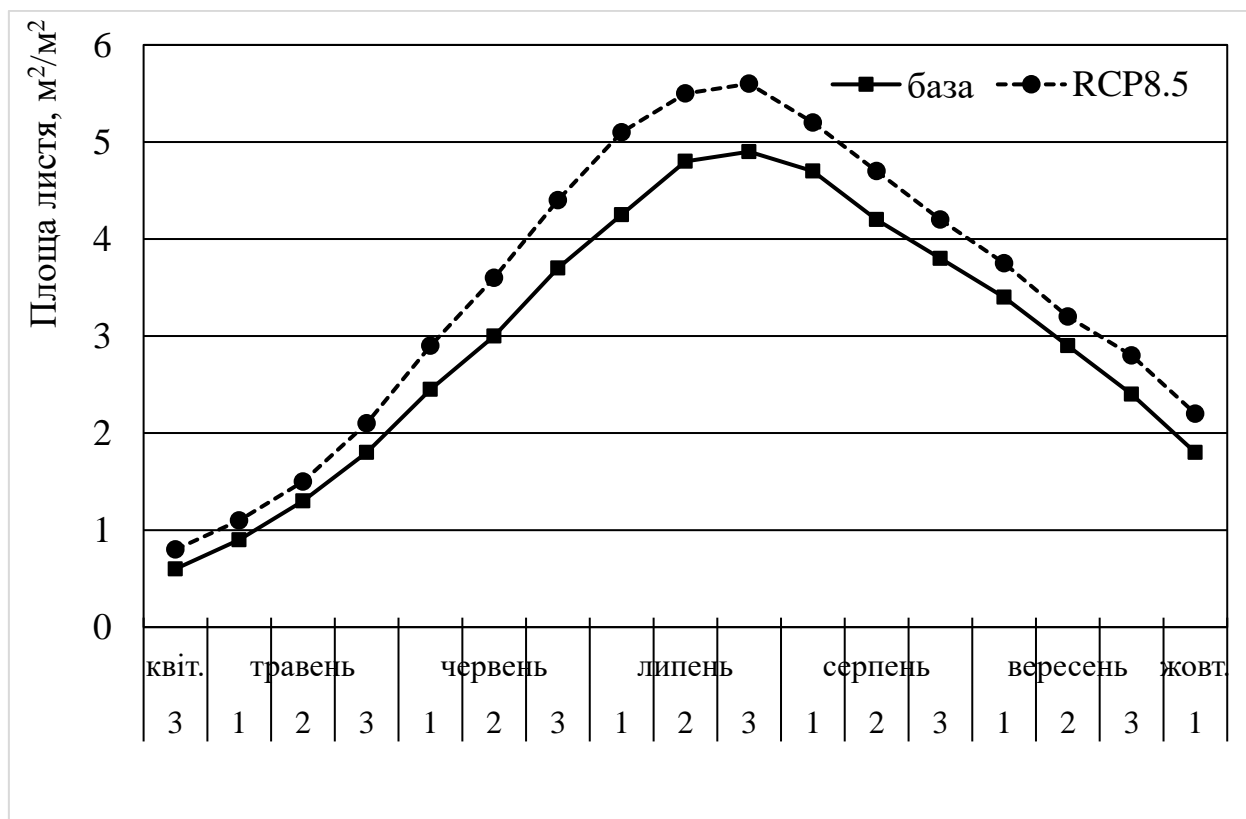


Рисунок 4.6 - Динаміка накопичення відносної площі листя за сценарієм RCP8.5 у порівнянні з базовими умовами

Таблиця 4.3 – Показники продуктивності енергоплантацій тополі за сценарієм RCP8.5 у порівнянні з базовими умовами

Період, сценарій	Загальна суха маса, ц/га			Фотосинтетичний потенціал, м ² /м ² за період	Урожай при 20% вологості, ц/га
	потенційного урожаю	метеорологічно можливого урожаю	дійсно можливого урожаю		
Базовий	403	210	145	509	122
RCP8.5	435	253	175	587	146
Різниця	32	43	30	78	24
Різниця, %	8	20	20	15	20

Як вже відзначалося, суми ФАР за сценарний період у цьому випадку набагато перевищують базові. Тому можна бачити, що сценарне значення ПУ також вище за базове. Значення становлять відповідно 403 і 435 ц/га, різниця становить 32 ц/га або 8%.

За сценарієм RCP8.5 значення вологозабезпеченості вегетаційного періоду тополі таке ж як і за базових умов, але у зв'язку з тим, що сценарні значення ПУ дещо більше ніж базові, сценарне значення ММУ і в цьому випадку перевищує базове. Умови, що очікуються за сценарієм RCP8.5 спричиняють зростання ММУ плантації до 253 ц/га, тобто на 43 ц/га більше за базове значення (210 ц/га). У відсотках ця різниця досить суттєва і становить 20%.

Оскільки ДМУ визначається перш за все балом ґрунтового бонітету, а він і для базового і для сценарного варіанту нами був вибраний однаковий – 0,69, то величина сценарного ДМУ також буде дещо перевищувати базове значення. Так, базовий ДМУ деревини становить 145 ц/га, а сценарний становитиме 175 ц/га, що на 30 ц/га чи на 20% більше.

Оскільки сценарне значення площі листя більше за базове, то й сценарний фотосинтетичний потенціал плантації тополі виявляється набагато більшим за базовий. Він становить 587 м²/м² за вегетаційний період проти базового значення 509 м²/м². Різниця становить 78 м²/м² чи 15%. Зміни

показників фотосинтетичної продуктивності спричиняють зміну фактичного урожаю сухої біомаси деревини тополі. За базових умов він становить 122 ц/га, а за сценарних – 146 ц/га. Це на 24 ц/га, або на 20% більше.

Таким чином, незважаючи на те, що сценарій RCP8.5 вважається найбільш “жорстким” із родини сценаріїв RCP, наші дослідження показали, що для посадок енергетичної тополі в Лісостепу України очікуються найсприятливіші умови саме за умов реалізації цього сценарію.

4.4 Оцінка продуктивності агрокліматичних ресурсів території Лісостепу для вирощування енергоплантацій тополі

Нами було виконано оцінку узагальнюючих характеристик ґрунтових та агрокліматичних умов формування продуктивності плантацій тополі. Рівень родючості ґрунтів Лісостепу (на прикладі Вінницької області), як вже відзначалося, прийнятий таким, що дорівнює 0,69 відн. Оцінка виконувалась на основі кількісних значень фактичних та сценарних урожаїв сухої деревини різних агроекологічних рівнів, а також з використанням узагальнюючих характеристик ґрунтових та агрокліматичних умов формування продуктивності енергоплантацій.

В таблиці 4.4 представлені узагальнені показники ґрунтових та агрокліматичних ресурсів вирощування тополі в Вінницькій області за сценарними та базовим варіантами: це сума ФАР, тривалість вегетаційного періоду, сума температур та опадів, фактичне вологоспоживання, потреба рослин у воді, та ГТК.

Сума активних температур за вегетаційний період тополі на досліджуваній території за базових умов становить 2833°C, а за сценарними умовами коливається в межах від 2452°C (сценарій RCP4.5) до 3474° С (сценарій RCP6.0). Сума ФАР за вегетаційний період за базових умов становить 152,1 кДж/см², а за сценарних умов коливається в межах від 152,9 кДж/см² (сценарій RCP4.5) до 169,9 (сценарій RCP6.0).

Таблиця 4.4 – Узагальнені характеристики ґрунтових та агрокліматичних ресурсів вирощування тополі в Лісостепу під впливом зміни клімату за сценаріями RCP

Загальні показники за вегетаційний період	Періоди, сценарії			
	Базовий	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Бал бонітету, відн. од.	0,69	0,69	0,69	0,69
Сума активних температур, °С	2833	2452	3474	2584
Сума ФАР за вегетаційний період, кДж/см ²	152,1	152,9	169,9	163,9
Тривалість вегетаційного періоду, діб	168	155	188	164
Сума опадів, мм	394	285	427	323
Вологопотреба рослин, мм (Е _о),	557	474	801	499
Фактичне вологоспоживання, мм (Е _ф)	400	317	530	348
ГТК, відн. од.	1,39	1,16	1,23	1,25

З табл. 4.4 видно, що тривалість вегетаційного періоду тополі за базових умов становить 168 діб, за сценаріями RCP4.5, RCP6.0 та RCP8.0 – відповідно 155, 188 та 164 доби.

Зволоження території визначається кількістю опадів. За базових умов кількість опадів становить 394 мм. За сценарними умовами кількість опадів коливається в межах 285 мм (сценарій RCP4.5) до 427 мм (RCP6.0).

Потреба рослин у волозі за базових умов становить 557 мм, а в умовах реалізації сценаріїв зміни клімату коливається в межах 474 мм (сценарій RCP4.5) - 801 мм (сценарій RCP6.0).

Сумарне випаровування за вегетаційний період тополі, яке ми вважаємо рівним фактичному вологоспоживанню, за базових умов в Вінницькій області становить 317 мм, а за сценарними умовами коливається від 348 мм (сценарій RCP8.5) до 530 мм (сценарій RCP6.0).

Екологічна класифікація кліматів ґрунтується головним чином на використанні двох найбільш важливих і добре вивчених факторів - температури і кількості опадів. Нами були визначені значення гідротермічного коефіцієнта Селянінова (ГТК), зволоження вегетаційного періоду за його значеннями характеризується таким чином:

- > 1,6 - надмірне;
- 1,6 ... 1,3 - достатнє зволоження;
- 1,3 ... 1,0 - недостатнє зволоження;
- 1,0 ... 0,7 - помірно посушливо;
- 0,7 ... 0,4 - суворо посушливо;
- <0,4 - напівпустелі, пустелі.

Гідротермічний коефіцієнт за вегетаційний період тополі за базових умов становить 1,39, що характеризує достатнє зволоження. За всіма сценарними варіантами умови зволоження за ГТК характеризуються як недостатні, а саме його значення коливаються від 1,16 (сценарій RCP4.5) до 1,25 (сценарій RCP8.5).

4.5 Агроекологічні категорії урожайності

Величини сухої біомаси потенційного врожаю (ПУ) деревини тополі коливаються в залежності від сценарію змін клімату (таблиця 4.5). Урожай за базовим варіантом становить 4033 г/м^2 і коливається в межах від 4055 г/м^2 (сценарій RCP4.5) до 4346 г/м^2 (сценарій RCP8.5).

Суша біомаса метеорологічно можливого врожаю тополі за базовий період становить 2098 г/м^2 . За умов реалізації сценарію RCP6.0 вона очікується найменшою – 2201 г/м^2 , а за сценарієм RCP8.5 – найбільшою і становитиме 2534 г/м^2 .

Розподілення ДМУ сухої біомаси енергоплантації тополі у Вінницькій області також представлено в табл. 4.5. Базове значення становить 1448 г/м^2 . Найменші значення ДМУ очікуються за умов реалізації сценарію RCP6.0 – 1519 г/м^2 , найбільші – для сценарію RCP8.5 – 1748 г/м^2 .

Базовий урожай у виробництві деревини тополі на території Вінницької області знаходиться в на рівні 121 ц/га . Його сценарні значення також коливаються від найменшого – 127 ц/га (сценарій RCP6.0) до найбільшого – 146 ц/га (сценарій RCP8.5).

Ступінь сприятливості кліматичних ресурсів (K_m) для вирощування тополі по території Вінницької області також змінюється в залежності від сценарного періоду. За базових умов її величина становить $0,52$. З таблиці. 4.5 видно, що найбільші значення ($0,592$ відн. од.) очікуються за сценарієм RCP4.5, дещо менше – за сценарієм RCP8.5 ($0,583$ відн. од.), а за умов реалізації сценарію RCP6.0 ступінь сприятливості кліматичних умов знижується до $0,530$ відн. од.

Описуючи оцінку рівня використання агрокліматичних ресурсів ($K_{акл}$) для тополі за вегетаційний період, з табл. 4.5 видно, що рівень в усіх варіантах дослідження становить $0,69$ відн.од.

Таблиця 4.5 - Узагальнені характеристики фотосинтетичної продуктивності тополі в Лісостепу під впливом зміни клімату за сценаріями RCP

Загальні показники за вегетаційний період	Періоди, сценарії			
	Базовий	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
ПУ, всієї сухої біомаси, г/м ²	4033	4055	4152	4346
ММУ, всієї сухої біомаси, г/м ²	2098	2401	2201	2534
ДМУ, всієї сухої біомаси, г/м ²	1448	1657	1519	1748
УВ, ц/га	121	138	127	146
Оцінка ступеня сприятливості кліматичних ресурсів K_m	0,52	0,592	0,530	0,583
Оцінка рівня культури землеробства $K_{земл}$	0,858	0,750	0,818	0,711
Оцінка рівня реалізації агроекологічного потенціалу $K_{аек.пот}$	0,447	0,444	0,434	0,414
Оцінка рівня використання агрокліматичних ресурсів $K_{акл}$	0,69	0,69	0,69	0,69

Також з таблиці 4.5 видно, що найвищий рівень реалізації агроекологічного потенціалу ($K_{аек.пот.}$) Вінницької області для тополі 0,447 відн. од. у базовому варіанті. В умовах реалізації сценарію RCP8.5 він найменший і становить 0,414 відн. од. В умовах реалізації сценарію RCP4.5 його значення зростає до 0,444 відн. од.

Оцінка рівня культури землеробства $K_{земл}$ для тополі за вегетаційний період в Вінницькій області, що наводиться в табл. 4.4, свідчить, що за базових умов він становить 0,858 відн. од. Коливання його величини по сценарним варіантам становить 0,414-0,434 відн. од.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз агрокліматичних умов вирощування тополі енергетичної показав, що на території Вінницької області за умов реалізації трьох сценаріїв зміни клімату родини RCP суми температур за вегетаційний період будуть дещо відрізнятися від базових. Так, сума температур за базових умов становить 2833°C. За умов реалізації сценарію RCP4.5 очікується її найбільше зниження – до 2452°C, за умов реалізації сценарію RCP8.5 - до 2584°C. За умов реалізації сценарію RCP6.0 очікується найвища сума температур – 3474°C

У цілому можна сказати, що умови теплозабезпеченості вегетаційного періоду тополі у період 2021-2050 рр. на території Вінницької області суттєво не зміняться.

2. За умов реалізації сценаріїв RCP4.5 та RCP6.0 вологозабезпеченість плантацій дещо погіршиться, це обумовлено у першому випадку зменшенням кількості опадів за вегетацію. Базова сума опадів за вегетаційний період становить 394 мм. За умов реалізації сценаріїв RCP4.5 вона зменшиться до 285 мм. За сценарієм RCP6.0 очікуються сценарні суми опадів дещо більше базових - 427 мм. Але підвищення температурного режиму сприятиме збільшенню випаровуваності протягом вегетаційного періоду і зменшенню показника вологозабезпеченості. Лише за сценарієм RCP8.5 вологозабезпеченість плантацій залишиться на базовому рівні.

Базове значення вологозабезпеченості складає 70 %. Вологозабезпеченість за сценаріями RCP4.5 та RCP6.0 зменшиться відповідно зменшиться до 64 та 66%. Вологозабезпеченість за сценарієм RCP8.5 не зміниться.

3. Потенційний урожай сухої біомаси тополі становить за базових умов 403 ц /га, у той час, коли за умов сценаріїв RCP4.5, RCP6.0 і RCP8.5 він становитиме 406, 415 і 435 ц/га відповідно. Інші агроекологічні категорії

урожайності деревини тополі за усіх сценарних умов також перевищують базові величини.

За базових умов урожай сухої маси тополі становить 122 ц/га. За умов зміни клімату за сценарієм RCP4.5 у період 2021-2050 рр. очікується збільшення урожаю до 138 ц/га, за сценарієм RCP6.0 - до 127 ц/га, за сценарієм RCP8.5 – до 146 ц/га. Таким чином, в умовах змін клімату урожаї тополі збільшаться на 4-20% в залежності від сценарію.

У цілому можна сказати, що за умов реалізації всіх сценаріїв умови зростання енергетичної тополі суттєво в Лісостепу не зміняться, тож не слід очікувати суттєвого зменшення продуктивності плантацій. А з врахуванням того, що енергетична тополя уже з другого року вегетації формує потужну кореневу систему, що глибоко проникає у ґрунт, можна сподіватися, що невелике погіршення умов зволоження не вплине суттєво на урожайність. Також слід пам'ятати, що при розробці сценаріїв зміни клімату фахівці враховують збільшення концентрації CO₂ в атмосфері, а саме вуглекислий газ, як відомо, є тою самою неорганічною речовиною, яку рослини (разом з водяною парою) використовують у процесі фотосинтезу при створенні органічної речовин. Ці обставини також можуть позитивно вплинути на формування майбутніх урожаїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Розпорядження КМУ від 18 серпня 2017 р. № 605-р Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність” URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p> (дата звернення: 08.11.2019 р.).
2. Купцов Н.С., Попов Е.Г. Энергоплантации. Справочное пособие по использованию энергетических растений. Минск: «Конфидо», 2015. 128 с.
3. Железная Т.А., Морозова А.В. Энергетические культуры как эффективный источник возобновляемой энергии / Промышленная теплотехника. 2008. т. 30. № 3. С. 60-67.
4. Агрокліматичний довідник по території України / за ред. Т.І. Адаменко, М.І. Кульбіді, А.Л. Прокопенка. - Кам'янець-Подільський: ПП Галагодза Р.С., 2011. – 108 с.
5. Андрійчук В.Г. Енергобезпека: енергозбереження і напрями диверсифікації енергопостачання (у контексті перспективи взаємодії України та Польщі) / Економічний часопис-XXI. 2007. № 7-8 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://soskin.info/ea/2007/7-8/200703.html>, ISSN 1728-6239.
6. Энергетические древесные культуры: ива и тополь. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://bio.ukr.bio/ru/articles/8778/>.
7. Шилін І.С. Представники роду тополя (*Populus genus*) як головні культивари для плантаційного лісовирощування / Лісове і садово-паркове господарство. 2015. №7. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Lis/article/view/9581>
8. Ищук Л.П. История культуры, опыт интродукции и хозяйственное использование видов рода *Populus L.* в Украине / Вестник КазНУ. Серия экологическая. №2/2 (44). 2015. С. 582–590.
9. Висоцька Н.Ю., Зубов О.Р., Зубова Л.Г., Фомін В.І. Стан захисних лісових смуг різного призначення в Олешківському районі Херсонської області / Лісівництво і агролісомеліорація. 2019. Вип. 135. С. 85-97.

10. Рудник А.М. Елементний склад бруньок бальзамічних тополь, які культивують в Україні / Фармацевтичний часопис. 2016. № 4. С. 62-64.
11. Юсупов Д.В., Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Ялалтдинова А.Р. Геохимические особенности элементного состава листьев тополя урбанизированных территорий / Известия Томского политехнического университета. 2016. Т. 327. № 6. С. 25–36
12. Пастернак Г.О. Випробування тополь на порушених землях Часів–Ярського родовища вогнетривких глин Донецької області / Збірка доповідей XXI Всеукраїнської наукової конференції аспірантів і студентів, присвяченої 90-річчю Донецького національного технічного університету, Дню Довкілля, Міжнародному року хімії. Донецьк, 2011. С. 44-45.
13. Кучерявий В.П. Озеленення населених місць. Львів: Світ, 2005. 456 с.
14. Ишук Л.П. Использование тополей (*Populus L.*) в урбоэкосистеме города Белая Церковь / Formation of urban green areas . 2016. Вып. 1(13). С. 142–150
15. Фучило Я.Д., Літвін В.М., Сбитна М.В. Біологічні, екологічні та технологічні аспекти плантаційного вирощування тополі в умовах Київського Полісся. Київ: Логос, 2012. 214 с.
16. Фучило Я.Д., Сбитна М.В., Гайда Ю.І., Козацька Н.Я. Ріст і продуктивність плантацій гібридних тополь в умовах західного лісостепу України / Науковий вісник НЛТУ України. 2017. т. 27. № 9. С. 43-47.
17. N. El Bassam Handbook of Bioenergy Crops London: Earthscan, 2010. 516 p.
18. Вагвелди Андреа, Фехер Шандор, Хорват Бела и др. Выращивание и эксплуатация лесных плантаций. Издательство: University of West Hungary Press, 2016. 134 с.
19. Цивенкова Н.М., Самылин А.А. Быстрорастущие плантации тополя – новая энергетическая сырьевая база / Леспромформ. 2005. № 8 (30). С. 58–63.
20. Царев А.П., Царев В.А. Биомасса тополей подрода *Europulus dode* для производства биоэнергии / Лесной вестник. 2015. Вып. 6. С. 57-62.

21. Фучило Я.Д., Сбитна М.В., Фучило О.Я., Літвін В.М. Досвід та перспективи вирощування тополі (*POPULUS SP.L.*) в південному степу України / Наукові праці Лісової академії наук України. 2009. Вип. 7. С. 66-69.
22. Аналітична записка БАУ № 10 (2014). «Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні». Публікація доступна на: www.uabio.org/activity/uabio-analytics.
23. Jones P.D., Harpham C. Estimation of the absolute surface air temperature of the Earth / *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118.
24. Семенов С.М., Говор И.Л., Уварова Н.Е. Роль метана в современном изменении климата. Москва, 2018. 106 с.
25. Кокорин А. О., Кураев С. Н. , Юлкин М. А. Обзор доклада Николаса Стерна «Экономика изменения климата». Издание 2-ое, дополненное и переработанное WWF, Strategic Programme Fund (SPF). Москва: WWF России, 2009. 60 с.
26. Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа, резюме для политиков, техническое резюме и часто задаваемые вопросы. Под ред. Томаса Ф. Стоккера и др. МГЭИК, 2013. 204 с.
27. Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая / Х.Г. Тооминг – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 200 с.
28. Тооминг Х.Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов / Х.Г. Тооминг – Л. : Гидрометеиздат, 1986. – 264 с.
29. Полевой А.Н. Базовая модель оценки агроклиматических ресурсов формирования продуктивности сельскохозяйственных культур. / А.Н. Полевой // *Метеорология, климатология и гидрология*. – 2004. – № 48. – С. 195-