

АГРОКЛІМАТИЧНА ОЦІНКА ПЕРСПЕКТИВ ВИРОЩУВАННЯ СВІТЧГРАСУ (*PANICUM VIRGATUM*) В ЛІСОСТЕПОВИХ ОБЛАСТЯХ ЗА УМОВ ЗМІНИ КЛІМАТУ

Вольвач О.В., Жигайло О.Л., Колосовська В.В., Ярмолінський О.Ю.
Одеський державний екологічний університет
вул. Львівська, 15, 65016, м. Одеса
rada.d.4109001@gmail.com

Використання поновлювальних та альтернативних джерел енергії є важливим внеском у здобуття енергетичної незалежності України. За останні два десятиріччя суттєво підвищився інтерес до біоенергетики та потреби у біоенергетичній сировині для виробництва біопалива.

Метою дослідження є оцінка агрокліматичних ресурсів двох лісостепових областей України – Вінницької та Полтавської стосовно вирощування світчграсу. Оскільки зміна клімату є глобальною та довгостроковою проблемою, що постала перед людством, проведено також оцінку умов формування продуктивності світчграсу на дослідженій території за умов змін клімату. Як теоретична основа була використана модель оцінки агрокліматичних ресурсів вирощування сільськогосподарських культур, адаптована для культури світчграсу. Всі розрахунки було виконано шляхом порівняння середніх багаторічних характеристик за 1986–2005 рр. (базовий період), і сценарних характеристик за сценарієм RCP4.5 – до 2050 рр.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що за умов реалізації сценарію зміни клімату RCP4.5 настання фаз розвитку світчграсу у досліджуваних областях зміститься на більш пізні строки, це зміщення у середньому становитиме близько тижня. Температурний режим вегетаційного періоду світчграсу на всій території практично не зміниться, однак відбудеться деяке погіршення умов вологозабезпеченості посівів. Під впливом зміни агрокліматичних умов вирощування світчграсу відбудеться і зміна рівня урожайності культури. Урожай у виробництві за базовий період становить у Вінницькій області – 150 ц/га, а у Полтавській 130 ц/га. За сценарними умовами вони дещо зменшаться – до 144 ц/га у Вінницькій області та до 138 ц/га у Полтавській. Тож слід очікувати не дуже суттєвого зменшення виробничих урожаїв. Але, оскільки світчграс вирощують на маргінальних землях (не сільськогосподарського призначення) протягом тривалого часу, тобто близько 15–20 років поспіль, таке несуттєве зменшення урожайності не вплине на значущість вирощування культури. *Ключові слова:* світчграс, модель продуктивності, зміна клімату, фази розвитку, агрокліматичні умови, урожай.

Agroclimatic assessment of prospects for growing switchgrass (*Panicum virgatum*) in forest-steppe regions in the context of climate change. Volvach O., Jigaylo O., Kolosovska V., Yarmolinsky O.

The use of renewable and alternative energy sources is an important contribution to Ukraine's energy independence. Over the last two decades, interest in bioenergy and the need for bioenergy raw materials for biofuel production have increased significantly.

The aim of the study is to assess the agro-climatic resources of two forest-steppe regions of Ukraine – Vinnytsia and Poltava – in relation to the cultivation of switchgrass. Since climate change is a global and long-term problem facing humanity, an assessment was also made of the conditions for the formation of switchgrass productivity in the study area under climate change. The model of estimation of agro-climatic resources of cultivation of agricultural crops, adapted for the culture of switchgrass, was used as a theoretical basis. All calculations were performed by comparing the average long-term characteristics from 1986 to 2005 (base period), and the scenario period for scenario RCP4.5 – until 2050.

The analysis of the obtained results shows that under the conditions of the RCP4.5 climate change scenario, the onset of the switchgrass development phases in all studied areas will be postponed to a later date, this shift will average about a week. The temperature regime of the vegetation period of switchgrass on the whole territory will not change, but there will be some deterioration of moisture conditions of crops. Under the influence of changes in agro-climatic conditions for growing switchgrass, there will be a change in crop yields. The highest yields in production for the base period are observed in Vinnitsa region – 150 c/ha, and 130 c/ha in Poltava. Under the scenario conditions, they will decrease slightly – to 144 c/ha in Vinnitsa region and 138 c/ha in Poltava region. Therefore, one should not expect a very significant reduction in production yields. However, since switchgrass is grown on marginal lands (non-agricultural) for a long time, about 15–20 years in a row, such a slight decrease in yield will not affect the importance of growing the crop. *Key words:* switchgrass, productivity model, climate change, development phases, agroclimatic conditions, harvest.

Постановка проблеми. Окрім того, що світові поклади нафти та газу не є нескінченними, треба пам'ятати, що значне використання цих речовин у минулому столітті спричинило збільшення викидів CO₂ в атмосферу та призвело до глобального потепління. Тому проблема екологічної безпеки за теперішнього часу вже набула геополітичного характеру. Для вирішення цієї проблеми не тільки в Україні, а у цілому світі останнім часом активно досліджу-

ється питання пошуку альтернативних джерел енергії та еколого-економічної доцільності використання цих джерел, основним з яких є біопаливо. За останні два десятиріччя суттєво підвищився інтерес до біоенергетики та зросли потреби у біоенергетичній сировині для виробництва біопалива. Оскільки більшість енергетичної сировини, що використовується в Україні є імпортованою, використання поновлювальних та альтернативних джерел енергії

є важливим внеском у здобуття енергетичної незалежності України [1–5].

Актуальність дослідження. Біомаса – це назва будь-якої органічної речовини, що була отримана з рослин в результаті процесу фотосинтетичного перетворення. Енергію біомаси отримують з рослинних і тваринних матеріалів, таких як лісова деревина, залишки сільськогосподарського та лісового виробництва, промислових відходів, відходів людини чи тварин. Вона не є викопним матеріалом (як, наприклад, нафта, вугілля та газ). Нова біомаса може знову вирости після того, як був зібраний урожай. Під час росту рослини використовують атмосферний діоксид вуглецю (CO_2) для утворення своєї органічної маси. Тому накопичення і збалансоване використання біомаси є майже карбоново нейтральним [6]. На законодавчому рівні поняття біомаси як сировини для енергетичного використання міститься у Законі України «Про альтернативні види палива» [7].

Стабільне збільшення площ енергоплантацій у світі, а також зростання інтересу до вирощування енергокультур в Україні обумовлено декількома факторами. По-перше, приріст біомаси на одиницю площі і, отже, обсяг її виробництва є стабільним і прогнозованим показником. Крім того, енергетичні культури не потребують використання прісної води для зрошення.

Другий важливий аспект вирощування енергетичних культур полягає у тому, що ці рослини не вимогливі до родючості ґрунту, не потребують значного використання добрив та пестицидів, запобігають ерозії ґрунту, сприяють збереженню та покращанню агроєкосистем та забезпечують низьку собівартість біомаси. Це дозволяє культивувати енергетичні рослини на низькородючих, деградованих і забруднених ґрунтах (так званих маргінальних), що дозволяє їх відновлювати [8, 9].

На сьогоднішній день в Україні площа сільськогосподарських земель становить 32 млн. га (54% від загальної площі), але з них 8 млн. га є малопродуктивними і вкладати в такі землі кошти та виробляти на них сільськогосподарську продукцію не вигідно. За даними Біоенергетичної асоціації України (UABIO) для біоенергетики можна використати 4 млн. га, що дозволить замінити 20 млрд m^3 природного газу кожного року, але до теперішнього часу ці землі повністю не використовуються [10].

За дослідженнями зарубіжних і вітчизняних дослідників можна зробити висновок, що найбільш придатними для вирощування з біоенергетичною метою є багаторічні злакові культури міскантус і просо прутноподібне чи світчграс. Вони є сировиною для виробництва паливної тріски та твердого палива [8].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тема дослідження відповідає основним напрямкам наукової діяльності кафедри агрометеорології та агро-

екології Одеського державного екологічного університету, зокрема НДР «Оцінка впливу змін клімату на поновлювальні та невичерпні природні ресурси України».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З-поміж багаторічних трав'янистих енергетичних культур родини Злакових або Тонконогових (*Poaceae*) в Україні одною з найбільш поширених є просо прутноподібне (*Panicum virgatum*) або світчграс (від англ. *Switchgrass*). Ще десять років назад ця культура була новою для України, хоча у Північній Америці, вона вже була популярною як трав'яна енергетична культура ще з кінця 80-х років минулого століття [8, 11].

Перші дослідження стосовно вимог світчграсу до умов навколишнього середовища, проведені вченими з США показали, що світчграс є культурою теплолюбною [6]. Стосовно українських умов вирощування визначено, що просо прутноподібне, як і інші теплолюбні культури, слід висівати, коли температура ґрунту на глибині 10 см перевищить $10\text{ }^\circ\text{C}$, а обираючи строки сівби слід завжди враховувати, що сходи гинуть за найменших заморозків. Після другого року вирощування рослини адаптуються до заморозків і далі вже витримують температуру нижче $-20\text{ }^\circ\text{C}$ навіть за відсутності снігового покриву. Також встановлено, що в умовах Лісостепу України насіння світчграсу проростає за температур $6\text{--}8\text{ }^\circ\text{C}$, але дружне проростання відбувається за прогрівання ґрунту до $15\text{--}16\text{ }^\circ\text{C}$ [12].

До вологості світчграс досить вимогливий. Кількість опадів протягом вегетації суттєво впливає на урожайність культури. Але у той же час рослини світчграсу дуже економно витрачають воду і мають високу посухостійкість. Транспіраційний коефіцієнт культури становить лише 250 [12].

Дослідженнями українських вчених [13] доведено, що світчграс здатний активно поглинати з ґрунту важкі метали і акумулювати їх в надземній та підземній частинах рослини. Отже, енергоплантації прутновидного проса не тільки здатні збагатити неродючі, так звані маргінальні, ґрунти органічною речовиною, а й прийняти участь у процесі фітореMediaції – одному з найефективніших методів дезактивації. Стосовно агротехніки вирощування світчграсу в умовах України останнім часом також проводяться численні дослідження [12, 14–16].

На початку інтродукції світчграсу в Україні успішно вирощувалися сорти американського походження Кейв-ін-рок та Картадж [14, 16]. В результаті селекційної роботи фахівців Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків в 2015 році було створено вітчизняний сорт світчграсу Морозко, а в 2018 році – Лядовський. В Національному ботанічному саді ім. М. М. Гришка НАН України також створено сорт прутновидного проса – Зоряне. Всі ці сорти внесені у Державний Реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні [17].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Метою дослідження є оцінка агрокліматичних ресурсів двох лісостепових областей України – Вінницької та Полтавської – стосовно вирощування світчграсу. Оскільки зміна клімату є глобальною та довгостроковою проблемою, що постала перед людством, проведено також оцінку умов формування продуктивності світчграсу на дослідженій території за умов змін клімату. Незважаючи на те, що світчграс натепер вже достатньо вивчений в агротехнічному, енергетичному та економічному аспектах, досліджень з врахуванням впливу майбутніх змін клімату на продуктивність культури у вітчизняній літературі немає.

Методологічне або загальнонаукове значення. Розуміння відношення світчграсу до умов навколишнього середовища та впливу змін цих умов на продуктивність культури надає змогу раціонально розміщувати посіви у певних ґрунтово-кліматичних зонах України, а також підбирати оптимальні елементи технології вирощування культури з врахуванням майбутніх змін клімату.

Викладення основного матеріалу. Оскільки традиційні агрометеорологічні спостереження на мережі гідрометстанцій України за енергокультурами поки ще не проводяться, для визначення впливу змін клімату на терміни настання фенологічних фаз рослин світчграсу було використано дані, отримані вченими Інституту цукрового буряку та біоенергетичних культур під час досліджень по вивченню цієї культури та перспектив її вирощування на території Лісостепу України [12, 15, 18].

Обраний для досліджень кліматичний сценарій RCP4.5, який вважається сценарієм стабілізації, належить до родини сценаріїв концентрацій парникових газів Representative Concentration Pathways на кінець 21 століття. Ці сценарії добре відомі та детально описані в вітчизняних та зарубіжних джерелах. Зокрема, за реалізації сценарію RCP4.5 до 2050 р. очікується збільшення концентрації парникових газів до 650 p.p.m [19–21].

Результати розрахунків за базовими та кліматичними даними представлені у табл. 1. За літературними даними, термін відновлення вегетації світчграсу майже співпадає з датою переходу температури повітря навесні через 10 °С, тому було вибрано саме цю дату. Найраніше починається відновлення вегетації посівів проса прутковидного в Полтавській області – 19 квітня. Дещо пізніше відновлюють вегетацію посіви в Вінницькій області – 22 квітня.

За умов реалізації сценарію RCP4.5 строки поновлення вегетації світчграсу зсуваються на більш пізні дати. У Вінницькій області відновлення відбуватиметься на тиждень пізніше – 29 квітня. У Полтавській області це запізнення буде ще тривалішим – на 9 днів, тобто відновлення вегетації відбудеться 28 квітня.

За нашими розрахунками, виконаними на основі літературних даних, для настання наступної фази розвитку світчграсу – вихід у трубку – необхідна сума температур вище 10° порядку 345 °С, що накопичується від дати відновлення вегетації. Як можна бачити з таблиці 1, вихід у трубку на посівах світчграсу на дослідженій території відбувається у Полтавській області 15 травня, а у Вінницькій – 18 травня. За умов реалізації сценарію RCP4.5 і фаза виходу в трубку також відбуватиметься пізніше на 8–9 днів: 24 травня у Полтавській області та 26 травня у Вінницькій.

Наступна фаза розвитку, що спостерігається у світчграсу – викидання волоті. Для її настання необхідно накопичення суми активних температур близько 870 °С. Як і для попередніх фаз, найраніше викидання волоті спостерігається за базових умов у Полтавській області – 3 липня, у Вінницькій області – 7 липня. За умов реалізації сценарію RCP4.5 спостерігається аналогічна ситуація – зсув термінів настання фази на 9–11 днів у бік більш пізніх дат. Так, у Полтавській області викидання волоті очікується 12 липня, а у Вінницькій – 18 липня.

Приблизно через три тижні після викидання волоті починає цвісти. Для настання цієї фази від дати викидання волоті повинна накопичитися сума температур близько 410 °С. За базових умов цвітіння

Таблиця 1
Фази розвитку світчграсу за базовими даними (1986–2005 рр.) та сценарієм зміни клімату RCP4.5 у лісостепових областях України

Період, сценарій	Відновлення вегетації	Вихід в трубку	Викидання волоті	Цвітіння волоті	Початок поживтіння листя
Вінницька область					
1986–2005	22.04	18.05	7.07	28.07	25.09
RCP4.5	29.04	26.05	18.07	7.08	5.10
Різниця	7	8	11	10	10
Полтавська область					
1986–2005	19.04	15.05	3.07	27.07	22.09
RCP4.5	28.04	24.05	12.07	31.07	25.09
Різниця	9	9	9	4	3

волоті в Полтавській області починається 27 липня, у Вінницькій – 28 липня. За умов реалізації сценарію зміни клімату RCP4.5 настання цієї фази очікується у Полтавській області на 4 дні пізніше за базовий строк – 31 липня. На 10 днів пізніше зацвіте волоть світчграсу у Вінницькій області – 7 серпня.

Світчграс збирають у різні терміни, в залежності від намірів використання урожаю (на насіння або на біомасу), часто збирання культури відбувається протягом зимових місяців, коли рослини повністю висохнуть. Тому останньою фазою розвитку світчграсу є початок підсихання листя. За настання цієї фази у рослин вже не відбувається активний ріст, а навпаки, загальна маса починає зменшуватися завдяки процесам висушування. Для того, щоб відбулося настання цієї фази необхідно накопичення від дати цвітіння волоті приблизно суми температур близько 1000 °С.

Як можна бачити з таблиці 1, за базових умов листя починає підсихати у Полтавській області 22 вересня, у Вінницькій – 25 вересня. Сценарні дати настання фази підсихання, як і у попередніх випадках очікуються дещо пізніше. Найменша різниця базової і сценарної дати – 3 дні у Полтавській області (підсихання листя почнеться 25 вересня). Різниця для Вінницької області більш суттєва – 10 днів, а підсихання листя почнеться, відповідно, 5 жовтня.

Крім дослідження впливу змін клімату на дати настання основних фаз розвитку світчграсу, представляє інтерес також питання впливу очікуваних змін на температурний режим та умови зволоження вегетаційного періоду.

Для вирішення цього питання були проаналізовані наступні дані: середні за міжфазні періоди температури повітря; суми активних температур повітря за окремі міжфазні періоди та за весь вегетаційний період; суми опадів за міжфазні періоди; сума опадів за вегетаційний період в мм та у відсотках від

кліматичної норми, за яку ми приймаємо базове значення; сумарне випаровування та випаровуваність за вегетаційний період; вологозабезпеченість за період вегетації.

Результати розрахунків для першого та другого міжфазних періодів світчграсу представлені у табл. 2. Як можна бачити з таблиці, відновлення вегетації світчграсу за базових умов відбувається за температур 11,2–13,1 °С, що повністю відповідає біологічними особливостям культури. Суми температур, які накопичуються за цей період також майже не відрізняються на всій території дослідження. В умовах зміни клімату за сценарієм RCP4.5 відновлення вегетації відбуватиметься за температур 12,5–13,3 °С, тобто сценарні середні за період температури і суми температур практично не будуть відрізнятися від базових.

Суми опадів за період відновлення вегетації – вихід у трубку за базових умов на всій досліджуваній території становлять 38 мм. За реалізації сценарію у Полтавській області сума опадів становитиме 41 мм, тобто майже не зміниться – всього на 8% від базового значення. Найбільше зростання очікується у Вінницької області, становитиме воно 21 мм або 55% від базового значення, тобто сценарна сума опадів буде більш ніж на половину вище базової – 59 мм.

Розглядаючи температурні умови періоду вихід в трубку – викидання волоті можна сказати, що, як і для першого міжфазного періоду, вони суттєво не зміняться. За умов реалізації сценарію RCP4.5 температури будуть лише на 0,3–1,1 °С нижче за базові. Сценарні суми опадів за цей період також зменшаться, причому і для Вінницької, і для Полтавської області досить помітно. За базової суми 138 мм у Вінницькій області, сценарне значення становитиме 120 мм, тобто сума опадів зменшиться на 18 мм (13%). За базової суми 105 мм у Полтавській області, сценарне значення становитиме 93 мм, тобто сума опадів зменшиться на 12 мм (11%).

Таблиця 2

Очікувані за сценарієм RCP4.5 агрокліматичні показники першого і другого міжфазних періодів світчграсу у порівнянні з базовими

Період, сценарій	Період відновлення вегетації – вихід в трубку			Період вихід в трубку – викидання волоті		
	середня температура, °	сума температур, °	сума опадів, мм	середня температура, °	сума температур, °	сума опадів, мм
Вінницька область						
1986–2005	13,1	342	38	17,4	872	138
RCP4.5	12,5	349	59	16,3	865	120
Різниця	–0,6	7	21	–1,1	–7	–18
Різниця, %			55			–13
Полтавська область						
1986–2005	11,2	336	38	18,0	880	105
RCP4.5	13,3	347	41	17,7	869	93
Різниця	2,1	11	3	–0,3	–29	–12
Різниця, %			8			–11

Порівняння агрокліматичних показників для третього і четвертого міжфазних періодів світчграсу представлені у табл. 3.

Період викидання волоті для світчграсу є критичним і від умов зволоження у першу чергу залежить майбутній урожай біомаси культури. Сценарні температурні умови цього періоду у Вінницькій області у порівнянні з базовими залишаються без змін. Досить суттєво збільшиться середня температура цього періоду у Полтавській області. Вона становитиме 21,3 °С, що у порівнянні з базовою буде на 3,8 °С вище. За достатнього зволоження така температура не призводить до зменшення продуктивності посівів, але, як можна бачити з таблиці, сума опадів за цей період за умов реалізації сценарію зменшиться більш ніж на половину від базової і становитиме 20 мм проти базових 50 мм. Тобто очікувані умови зволоження критичного періоду світчграсу у Полтавській області будуть несприятливими для культури. Також зменшення сум опадів у критичний період слід очікувати і у Вінницькій області. Можна сказати, що ці суми зменшаться більш ніж на третину у порівнянні з базовим варіантом – на 39%.

Період цвітіння волоті – початок пожовтіння листя у світчграсу є досить довгим, його тривалість становить близько двох місяців, протягом яких світчграс є більш вимогливим до вологості, аніж до тепла. Як можна бачити з таблиці, температурні умови цього періоду за умов реалізації сценарію RCP4.5 зміняться на всій території дослідження несуттєво і відповідатимуть біологічним вимогам культури.

Стосовно сум опадів за цей період можна бачити, що відбуватиметься подальше їх зменшення. У Вінницькій області базова сума опадів становить 135 мм, а сценарна – 79 мм (тобто на 56 мм чи 41% менше). Відповідні величини для Полтавської області становлять: базова сума – 102 мм, сценарна – 57 мм, зменшення – 45 мм (44%).

У таблиці 4 представлені узагальнені температурні та вологісні характеристики вегетаційного періоду світчграсу на досліджуваній території. Можна бачити, що сценарний вегетаційний період на дослідженій території буде починатися на 7–9 днів пізніше за базовий, але й закінчуватися він також буде пізніше, в середньому по двом областям на тиждень. Суми температур, що очікуються за умов зміни клімату, практично не відрізняються, тому можна сказати, що температурні умови вегетаційного періоду світчграсу залишаються без змін.

Інша ситуація очікується з показниками зволоження. Сценарні суми опадів за вегетацію світчграсу по обом дослідженим областям суттєво зменшаться. Базове значення суми опадів для Вінницької області становить 370 мм, тоді як очікуване – 294 мм, що на 76 мм (21%) менше. У Полтавській області опади зменшаться найсуттєвіше. Тут базове їх значення є найменшим по досліджуваній території – 296 мм. За умов реалізації сценарію RCP4.5 сума опадів зменшиться майже на третину і становитиме 211 мм.

Базова величина сумарного випаровування (E_{ϕ}) посівів світчграсу у Вінницькій області становить 441 мм, базове значення вологопотребності (E_o) становить 540 мм. За умов реалізації сценарію RCP4.5, завдяки зменшенню кількості опадів, фактичне вологоспоживання посадок також зменшиться на 70 мм і становитиме 371 мм. Також за сценарних умов відбудеться і зменшення величини випаровуваності (E_v) до 489 мм. У порівнянні із базовим значенням це зменшення становить 51 мм.

Базова величина сумарного випаровування (E_{ϕ}) посівів світчграсу у Полтавській області становить 376 мм, базове значення вологопотребності (E_o) становить 510 мм. Як і в попередньому випадку, сценарне фактичне вологоспоживання зменшиться на 31 мм і становитиме 345 мм. Але у Полтавській області за сценарних умов відбудеться невелике

Таблиця 3

Очікувані за сценарієм RCP4.5 агрокліматичні показники третього і четвертого міжфазних періодів світчграсу у порівнянні з базовими

Період, сценарій	Період викидання волоті – цвітіння			Період цвітіння – початок пожовтіння листя		
	середня температура, °	сума температур, °	сума опадів, мм	середня температура, °	сума температур, °	сума опадів, мм
Вінницька область						
1986–2005	19,8	416	59	16,8	994	135
RCP4.5	20,2	404	36	14,4	835	79
Різниця	0,4	–12	–23	–2,4	–159	–56
Різниця, %			–39			–41
Полтавська область						
1986–2005	17,5	420	50	17,5	998	102
RCP4.5	21,3	405	20	17,8	994	57
Різниця	3,8	–15	–30	0,3	–4	–45
Різниця, %			–60			–44

Таблиця 4

Агрокліматичні умови вегетаційного періоду світлграсу у Лісостепу в порівнянні з умовами за сценарієм RCP4.5 зміни клімату

Сценарій, період	Вінницька область			Полтавська область		
	Базовий	RCP4.5	різниця	Базовий	RCP4.5	різниця
Дата відновлення вегетації	22.04	29.04	7	19.04	28.04	9
Сума активних температур за вегетацію, °C	2624	2518	-106	2634	2615	-19
Сума опадів за період, мм	370	294	-76	296	211	-85
Сумарне випаро-вування за період (E), мм	441	371	-70	376	345	-31
Випаровуваність за період, (E ₀), мм	540	489	-51	510	550	40
Вологозабезпеченість (E/E ₀), %	82	76	-6	74	63	-11
Середній за період ГТК, відн. од.	1,41	1,17	-0,24	1,13	0,80	-0,33
Сума ФАР, кДж/см ² за період	152	153	1	160	164	4

збільшення величини випаровуваності (E₀) до 550 мм, тобто на 40 мм.

За сценарних умов зменшиться і сценарна величина вологозабезпеченості вегетаційного періоду світлграсу по всій території дослідження. У Вінницькій області вона становитиме 76% проти 82% базових, у Полтавській – 63% проти 74% базових. Також за рахунок сценарного зменшення кількості опадів зменшиться величина ГТК: з базової 1,13–1,41 до сценарної 0,80–1,17 відн. од.

Фотосинтетично активна радіація (ФАР) приймає участь в процесі фотосинтезу і її сумарні величини за вегетаційний період суттєво впливають на урожайність будь-якої сільськогосподарської культури. За умов реалізації сценарію RCP4.5 не очікується змін сум ФАР у Вінницькій області, а у Полтавській сценарні суми ФАР будуть дещо більше базових.

Таким чином, можна зробити висновок, що на території двох лісостепових областей радіаційно-термічний режим вирощування світлграсу за сценарними умовами практично не зміниться. Тому вирішальним фактором подальших перспектив створення енергопосівів лозовидного проса на території Вінницької та Полтавської областей, вочевидь, будуть умови зволоження.

Розрахунки продуктивності посівів і визначення урожаїв різних агроєкологічних категорій виконувались за допомогою математичної моделі А.М. Польового. Її алгоритм базується на принципах максимальної продуктивності посівів Х. Тоомінга [22, 23]. Результати представлені в табл. 5.

Потенційний урожай (ПУ) – це максимальний урожай фітомаси посівів світлграсу, який можна виростити за оптимальної забезпеченості рослин вологою, теплотою і мінеральним ґрунтовим живленням. У такому випадку він визначається лише

приходом ФАР протягом вегетаційного періоду і коефіцієнтом її використання. При базових умовах ПУ загальної сухої маси світлграсу становить у Вінницькій області 530 ц/га. Сценарний ПУ тут практично залишиться на рівні базового.

В умовах Полтавської області базовий ПУ сухої загальної біомаси становить 563 ц/га. У цій області очікується трохи більше значення ФАР, відповідно сценарний ПУ сухої загальної біомаси становитиме 588 ц/га.

Як вже відзначалося, величини метеорологічно-можливого урожаю (ММУ) всієї сухої маси будуть визначатися ступенем вологозабезпеченості посівів. У Вінницькій області ММУ становить 288 ц/га, а у Полтавській 260 ц/га. Після зменшення величини вологозабезпеченості за сценарних умов ММУ становитиме 270 та 224 ц/га відповідно. Тобто можна сказати, що сценарне погіршення умов зволоження вегетаційного періоду спричинить втрати метеорологічно-можливих урожаїв світлграсу на досліджуваній території у межах 6–14 %.

Базовий рівень дійсно-можливого урожаю (ДМУ) загальної сухої біомаси світлграсу, обумовлений природною родючістю ґрунту, становить у Вінницькій області 199 ц/га, а у Полтавській – 161 ц/га. За умов зміни клімату з табл. 5 можна бачити, що очікувані величини ДМУ дещо менше – на 6% у Вінницькій області (тут ДМУ становить 186 ц/га) і на 14% у Полтавській (тут ДМУ становить 139 ц/га).

Відомо, що урожайність будь-якої сільськогосподарської культури визначається не тільки агрометеорологічними умовами, що складаються протягом вегетації, але й показниками фотосинтетичної продуктивності її посівів. Перш за все це – площа листової поверхні і фотосинтетичний потенціал, тобто загальна площа листя посіву, що приймала участь у фотосинтезі протягом всього вегетаційного періоду.

Таблиця 5

Показники продуктивності посівів світчграсу у Лісостепу порівнянні з умовами за сценарієм RCP4.5 зміни клімату

Період, сценарій	Загальна суха маса, ц/га			Фотосинтетичний потенціал, м²/м² за період	Урожай при 20% вологості, ц/га
	потенційного урожаю	метеорологічно можливого урожаю	дійсно можливого урожаю		
Вінницька область					
Базовий	530	288	199	545	150
RCP4.5	532	270	186	531	144
Різниця	2	−18	−13	−14	−6
Різниця, %	0	6	6	3	4
Полтавська область					
Базовий	563	260	161	464	130
RCP4.5	588	224	139	445	120
Різниця	25	−36	−22	−19	−10
Різниця, %	4	14	14	5	8

Базове значення фотосинтетичного потенціалу посівів становить у Вінницькій області 545 м²/м², за умов зміни клімату за сценарієм RCP4.5 воно дещо зменшиться до 531 м²/м², тобто на 14 м²/м² (на 3%). Базове значення фотосинтетичного потенціалу посівів становить у Полтавській області 464 м²/м², за умов зміни клімату за сценарієм RCP4.5 воно також дещо зменшиться до 445 м²/м², тобто на 19 м²/м² (на 5%).

Розподіл урожайності біомаси світчграсу за стандартної 20% вологості у виробництві (УВ) також подібний до розподілу ММУ і ДМУ. Найбільші врожаї у виробництві очікуються у базовий період – 150 ц/га у Вінницькій області, та 130 ц/га у Полтавській. За сценарними умовами вони дещо зменшаться – до 144 ц/га у Вінницькій області та 138 ц/га у Полтавській.

Головні висновки. Таким чином, за умов реалізації сценарію RCP4.5 термічні ресурси вегетаційного періоду світчграсу до 2050 рр. зміняться не суттєво, але відбудеться деяке погіршення умов вологозабезпеченості посівів на всій досліджуваній території. Тому слід очікувати не дуже суттєвого зменшення виробничих урожаїв. Але, оскільки світчграс вирощують на маргінальних землях (не сільськогосподарського призначення) протягом тривалого часу, тобто близько 15–20 років поспіль, таке несуттєве зменшення урожайності не вплине на значущість вирощування культури.

Також не слід забувати, що не менш важливою особливістю багаторічних енергетичних культур

є продукування значного обсягу рослинних решток після закінчення вегетації. Це в свою чергу за наявності вологи та при взаємодії із ґрунтовою біотою сприяє накопиченню органічної речовини у ґрунті. Також перевагами вирощування біомаси світчграсу для навколишнього середовища є: відсутність потреби використання пестицидів, боротьба з ерозією ґрунтів, сприяння збереженню природних умов, поліпшенню структури ґрунту та зменшення викидів парникових газів.

Тому слід вважати вирощування світчграсу на території лісостепових областей України, як і інших біоенергетичних культур, дуже перспективним і приділяти цьому питанню більшу увагу.

Перспективи використання результатів дослідження. Світчграс часто розглядаються як майбутнє біоенергетики. Це зумовлено тим, що як багаторічник, він набагато краще зберігає вуглець у ґрунті та у своїй біомасі, ніж традиційні паливні культури, такі, як, наприклад, рапс. Світчграс також здатний зростати на маргінальних землях, що виключає конкуренцію з сільськогосподарськими культурами, що вирощуються для виробництва продуктів харчування.

Отримані результати будуть використані під час подальшого виконання науково-дослідної тематики кафедри агрометеорології та агроекології ОДЕКУ. Також перспективними є аналогічні дослідження в умовах реалізації інших відомих кліматичних сценаріїв змін клімату.

Література

1. Долинский А., Гелетуха Г. Возможности замещения природного газа в Украине за счет местных видов топлива. *Энергетическая политика Украины*. 2006. № 3–4. С. 60–65.
2. Гуцаленко О.О., Корпанюк Т.М. Еколого – економічні аспекти виробництва біопалива в контексті енергозберігаючої політики держави. *Наукові праці інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2013. Вип. 19. С. 174–181.
3. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Трибой О.В. Перспективи вирощування та використання енергетичних культур в Україні. *Аналітична записка БАУ*. 2014. № 10. Публікація доступна на: www.uabio.org/activity/uabio-analytics
4. Пришляк Н.В. Потенційні можливості вирощування біоенергетичної сировини на виробництво твердого біопалива. *Агросвіт*. 2021. № 1–2. С. 35–43. DOI: 10.32702/2306&6792.2021.1-2.33

5. Калетник Г.Н., Токарчук Д.М. Ефективність вирощування енергетичних культур та їх переробки на біопаливо в контексті забезпечення енергетичної автономії аграрних підприємств. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2021. № 1. С. 7–25. DOI:10.37128/2411-4413-2021-1-1
6. Bassam N. Handbook of Bioenergy Crops. London: Earthscan, 2010. 516 p.
7. Закон України «Про альтернативні види палива» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14#Text> (дата звернення: 20.05.2022)
8. Курило В.Л., Рахметов Д.Б., Кулик М.І. Біологічні особливості та потенціал урожайності енергетичних культур родини тонконогових в умовах України. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2018. Вип. 1(88). С. 11–17. DOI 10.31210/visnyk2018.01.01
9. Mehmood M., Muhammad I., Umer R., Muhammad N., Shafaqat A., Athar H., Munazza G. Biomass production for bioenergy using marginal lands. *Sustainable Production and Consumption*. 2017. Vol. 9. P. 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.08.003>
10. Гелетуха Г.Г. Біомаса як паливна сировина. *Промислова теплотехніка*. 2011. Т. 55. № 5. С. 76–78.
11. Мороз О.В., Смірних В.М., Курило В.Л. Свічграс як нова фітоенергетична культура. *Цукрові буряки*. 2011. № 3. С. 12–14.
12. Гументик М.Я., Радейко Б.М., Фучило Я.Д. та ін. Вирощування біоенергетичних культур : монографія / за ред. М.Я. Гументика. Київ : ТОВ «ЦП «Компринт», 2018. 179 с.
13. Кулик М.І., Галицька М.А., Самойлік М.С., Жорник І.І. Фіторемедіаційні аспекти використання енергетичних культур в умовах України. *Agrology*. 2019. Т. 2. № 1. С. 65–73. doi: 10.32819/2617-6106.2018.14020
14. Браніцький Ю.Ю., Мазур О.В. Кількісні показники рослин проса лозовидного за різних технологічних прийомів вирощування. *Збірник наукових праць ВНАУ. Сільське господарство та лісівництво*. 2019. № 12. С. 28–43.
15. Gumentyk M., Kharytonov M. Development and assessment of technologies of miscanthus and switchgrass growing in Forest-steppe zone of Ukraine. *Agriculture & Forestry*. 2018. Vol. 64. Issue 2. P. 137–146. DOI: 10.17707/AgricultForest.64.2.10
16. Mazur V.A., Branitskyi Y.Y., Pantsyreva H.V. Bioenergy and economic efficiency technological methods growing of switchgrass. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. 10(2). P. 8–15. doi: 10.15421/2020_56
17. Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2021 рік. [Електронний ресурс] URL: <https://sops.gov.ua/reestr-sortiv-roslin>
18. Гументик М.Я. Агротехнологічні основи формування продуктивності багаторічних злакових культур для виробництва біопалива в Лісостепу України: автореф. дис. ... доктор с.-г. наук: спец. 06.01.09 – рослинництво; Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН. Київ, 2021. 43 с.
19. Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату: монографія / за ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. Одеса : ТЕС, 2018. 548 с.
20. Kriegler E., Bauer N., Popp A., Humpenöder F. and etc. Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*. 2017. Volume 42. P. 297–315. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.015>
21. Cronin J., Zabel F., Dessens O., Anandarajah G. Land suitability for energy crops under scenarios of climate change and land-use. *GCB Bioenergy*. 2020. Vol. 12. Issue 8. P. 648–665. DOI: 10.1111/gcbb.12697
22. Полевой А.Н. Базовая модель оценки агроклиматических ресурсов формирования продуктивности сельскохозяйственных культур. *Метеорология, климатология и гидрология*. 2004. Вып. 48. С. 195–205.
23. Тооминг Х.Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 254 с.