

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Факультет економіки та екології моря

Кафедра екології та природоохоронних технологій

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

 Трохименко Г.Г.
« 15 » 12 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

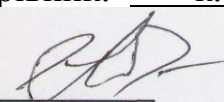
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему **«ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ АГРОВОЛЬТАЇЧНИХ СИСТЕМ
НА БІОРІЗНОМАНІТТЯ ТА СТАН ҐРУНТІВ»**

Виконала: студентка 6281м групи

 **Іванченко К.В.**
(підпис)

Керівник: к.т.н., професор НУК
(уковий ступінь, вчене звання)

 **Літвак С.М.**
(підпис)

Миколаїв – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Факультет економіки та екології моря

Кафедра _____ екології та природоохоронних технологій _____

Спеціальність 183 Технології захисту навколишнього середовища

Освітня програма «Технології захисту навколишнього середовища»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гара **Гарант освітньої програми**
к.т.н., професор НУК
Літвак С.М.

“ 15 ” 12 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»**

Студентці _____ Іванченко Ксенії Віталіївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи: «Екологічна оцінка впливу агровольтаїчних систем на біорізноманіття та стан ґрунтів».

Керівник роботи Літвак Сергій Михайлович, канд. техн. наук, професор НУК

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

Затверджені наказом ректора № 1312-УЧ від « 31 » жовтня 2025 року

2. Термін подання роботи: 10.12.2025 р.

3. Вихідні дані по роботі: нормативно-законодавчі акти, методичні рекомендації, наукові публікації за темою дослідження.

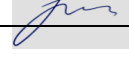
4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)

1. Теоретичні основи поняття агровольтаїки, її переваги та недоліки. 2. Тенденції розвитку агровольтаїки в Україні та світі. 3. Технологічні та агрономічні аспекти впливу агровольтаїки на сільське господарство. 4. Експериментальна модель агровольтаїчної системи для посушливого південного регіону України.

5. Економічна оцінка впроваджуваної APV моделі .6. Охорона праці.

5. Перелік презентаційних матеріалів: Презентація – 22 слайди.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
5	Літвак О.А., к.е.н., доцент		
6	Маринець О.М., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 03.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

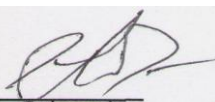
Номер	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір теми кваліфікаційної роботи	03.09.2025	
2	Визначення мети, завдань, об'єкта та предмета дослідження	10.09.2025	
3	Складання плану, підбір і опрацювання списку використаних джерел	17.09.2025	
4	Вивчення теоретичних основ поняття агровольтаїки	28.09.2025	
5	Аналіз сучасних тенденцій розвитку агровольтаїки в світі та Україні	14.10.2025	
6	Дослідження технологічних та агрономічних аспекти впливу агровольтаїки на сільське господарство	20.10.2025	
7	Розробка експериментальної моделі агровольтаїчної системи для південного регіону України	26.10.2025	
8	Еколого-економічне обґрунтування розробленого проекту	15.11.2025	
9	Розробка заходів з охорони праці та техніки безпеки	25.11.2025	
10	Оформлення пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	30.11.2025	
11	Підготовка до захисту кваліфікаційної роботи	10.12.2025	
12	Захист кваліфікаційної роботи	23.12.2025	

Студентка


(підпис)

Іванченко К.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Літвак С.М.
(прізвище та ініціали)

Анотація
до кваліфікаційної роботи «Екологічна оцінка впливу агровольтаїчних систем на біорізноманіття та стан ґрунтів»
студентки Іванченко Ксенії Віталіївни

Метою дослідження є обґрунтування екологічного впливу агровольтаїчних систем на елементи біорізноманіття, стан ґрунтів та агроекологічні процеси, а також визначення їх ефективності для стійкого землекористування в кліматичних умовах Півдня України.

Об'єктом дослідження є агровольтаїчні системи як інтегровані енергетично-аграрні комплекси, що впливають на умови функціонування агроєкосистем, зокрема на стан ґрунтів, біорізноманіття та вирощування культур.

Предметом дослідження є екологічні та агроекологічні взаємозв'язки між параметрами агровольтаїчних систем та їх впливом на стан ґрунтів, елементи біорізноманіття і ефективність землекористування в агроєкосистемах.

У першому розділі висвітлено теоретичні основи агровольтаїки, розглянуто її сутність, принципи, переваги та недоліки, а також проаналізовано міжнародні стандарти та обґрунтовано необхідність їх адаптації в Україні.

У другому розділі проаналізовано світові тенденції розвитку агровольтаїчних технологій, оцінено стан і перспективи впровадження агровольтаїки в Україні та прогнозовано зростання ринку.

У третьому розділі досліджено технологічні та агрономічні аспекти впливу агровольтаїки на сільське господарство, зокрема методи встановлення панелей, фактори роботи фотоелектричних систем та ефекти затінення на культури.

Четвертий розділ присвячено розробці концепції експериментальної агровольтаїчної установки для посушливого півдня України (Одеська область), вибрано оптимальні конструктивні параметри (підвищені панелі, низький кут нахилу, використання звичайних та напівпрозорих модулів), культуру-дослідник (томат посухостійкого сорту) та комплекс методик моніторингу мікроклімату, фізіологічних процесів рослин і якості плодів. За результатами моделювання APSIM проаналізовано комплексний екологічний вплив агровольтаїчної системи на біорізноманіття, стан ґрунтів і мікроекологічні процеси.

У п'ятому розділі проведено оцінку енергетичної ефективності системи, розрахунок самоспоживання та експорту електроенергії. Розраховано коефіцієнти ефективності землекористування (LER) у біофізичному та економічному вимірах.

У шостому розділі розглянуто питання охорони праці, проаналізовано небезпечні фактори, виконано розрахунок електробезпеки та розроблено заходи безпеки при монтажі й експлуатації станції.

Кваліфікаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Основний зміст викладено на 127 сторінках комп'ютерного тексту, у тому числі 39 рисунків, 7 таблиць. Список використаних джерел складається із 74 найменувань.

Ключові слова: агровольтаїка, подвійне землекористування, врожайність томатів, агроєкосистеми, мікроклімат, біорізноманіття, стан ґрунтів, енергоефективність.

Summary
to the qualification work «Ecological assessment of the impact of agrivoltaic systems on biodiversity and soil condition»
Ivanchenko Kseniia

The purpose of the study is to substantiate the ecological impact of agrivoltaic systems on the condition of soils, elements of biodiversity and agroecological processes, as well as to determine their effectiveness for sustainable land use in the South of Ukraine.

The object of the study is agrivoltaic systems as integrated energy-agricultural complexes that affect the conditions of functioning of agroecosystems, in particular on the condition of soils, biodiversity and crop cultivation.

The subject of the study is the ecological and agroecological relationships between the parameters of agrivoltaic systems and their impact on the condition of soils, elements of biodiversity and the efficiency of land use in agroecosystems.

In the first chapter, the theoretical foundations of agrivoltaics are presented, its essence, principles, advantages and disadvantages are considered, international standards are analyzed, and the need for their adaptation in Ukraine is substantiated.

In the second chapter, global trends in the development of agrivoltaic technologies are analyzed, the state and prospects of agrivoltaics implementation in Ukraine are assessed, and market growth is forecasted.

In the third chapter, the technological and agronomic aspects of the impact of agrivoltaics on agriculture are investigated, including methods of solar panel installation, factors affecting the operation of photovoltaic systems, and the effects of shading on crops.

The fourth chapter is devoted to the development of the concept of an experimental agrivoltaic installation for the arid south of Ukraine (Odesa region), selection of optimal design parameters (elevated panels, low tilt angle, use of conventional and semi-transparent modules), the test crop (drought-resistant tomato variety), and a set of methods for monitoring microclimate, physiological processes of plants, and fruit quality. Based on the results of APSIM modelling, the comprehensive environmental impact of the agrivoltaic system on biodiversity, soil condition, and microecological processes was analysed.

The fifth chapter the energy efficiency of the system is evaluated, self-consumption and electricity export are calculated. Land use efficiency coefficients (LER) are calculated in biophysical and economic dimensions.

In the sixth chapter, occupational safety issues are considered, hazardous factors are analyzed, electrical safety calculations are performed, and safety measures for installation and operation of the station are developed.

The qualification work consists of an introduction, six chapters, conclusions, a list of references, and appendices. The main content is presented on 127 pages of computer text, including 39 figures and 7 tables. The list of references includes 74 items.

Keywords: agrivoltaics, dual land use, tomato yield, agroecosystems, microclimate, biodiversity, soil condition, energy efficiency.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	12
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АГРОВОЛЬТАЇКИ	12
1.1. Сутність поняття агровольтаїки	12
1.2. Принципи, переваги та недоліки впровадження агровольтаїчних систем ...	19
1.3. Стандарти для агровольтаїки та їх адаптація в Україні.....	25
РОЗДІЛ 2	31
АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ АГРОВОЛЬТАЇКИ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ	31
2.1. Світові тенденції розвитку агровольтаїчних технологій.....	31
2.2. Стан і перспективи впровадження агровольтаїки в Україні	36
2.3. Оцінка перспектив росту світового ринку агровольтаїки	44
РОЗДІЛ 3	53
ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА АГРОНОМІЧНІ АСПЕКТИ АГРОВОДЬТАЇЧНИХ СИСТЕМ	53
3.1. Методи встановлення сонячних панелей для оптимізації агрофотовольтаїчних систем	53
3.2. Фактори, що впливають на роботу фотоелектричних систем	62
3.3. Вплив агровольтаїчних систем на сільськогосподарські культури	68
РОЗДІЛ 3.....	75
КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ВПЛИВУ АГРОВОЛЬТАЇЧНИХ СИСТЕМ НА ВРОЖАЙНІСТЬ ТОМАТІВ, ЕЛЕМЕНТИ БІОРІЗНОМАНІТТЯ ТА СТАН ҐРУНТІВ В УМОВАХ ПІВДНЯ УКРАЇНИ	75
4.1. Обґрунтування вибору об'єкта дослідження	75
4.2. Матеріали та методи дослідження	79
4.3. Управління вологістю, біометричними вимірюваннями та врожайністю....	83
4.4. Обговорення та інтерпретація результатів симуляцій.....	86
4.4.1. Погодні умови та фізіологічні параметри.....	86
4.4.2. Водопостачання та зрошення.....	92
4.4.3. Взаємозв'язок між затіненням та морфологією рослин	93
4.4.4. Вплив AVS на врожайність помідорів	94
4.4.5. Аналіз показників якості томатів	99

4.5. Комплексний вплив агровольтаїчної системи на біорізноманіття, стан ґрунту та мікроекологічні процеси	100
РОЗДІЛ 5	108
ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	108
5.1. Оцінка виробництва електроенергії під час експерименту та її ефективність	108
5.2. Розрахунок ефективності землекористування (коефіцієнт LER)	112
РОЗДІЛ 6	115
ОХОРОНА ПРАЦІ	115
6.1 Основні положення охорони праці	115
6.2. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів на етапах життєвого циклу фотоелектричних систем	117
6.3. Розрахунок електронезбезпеки на об'єкті агровольтаїчної станції	119
6.4. Заходи техніки безпеки при монтажі сонячних панелей.....	123
ВИСНОВКИ.....	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	128
Додатки	134

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AV	Agrovoltaic	Агровольтаїка
APV	Agrophotovoltaic	Агрофотовольтаїка
AVS	Agrioltaic System	Агровольтаїчна система
COL	Colour index	Індекс кольору
Con	Conventional	Звичайні (непрозорі панелі)
DM	Dry Matter	Суха речовина
ET	Evapotranspiration	Евапотранспірація
FC	Field Capacity	Польова вологомісткість
GHG	Greenhouse Gas	Парниковий газ
iWUE	intrinsic Water Use Efficiency	Внутрішня ефективність використання води
PAR	Photosynthetically Active Radiation	Фотосинтетична активна радіація
PV	Photovoltaic	Фотовольтаїка
PWP	Permanent Welting Point	Точка постійного в'янення
RAW	Readily Available Water	Легкодоступна вода
ST	Semi-transparent	Напівпрозорі (панелі)
TA	Titrateable Acidity	Титрована кислотність
TAW	Total Available Water	Загальнодоступна вода
TSS	Total Soluble Solids	Загальний вміст розчинних сухих речовин
WC	Water Content	Вміст води
WP	Water Productivity	Продуктивність води
WUE	Water Use Efficiency	Ефективність використання води

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток енергетичного та аграрного секторів України вимагає впровадження інноваційних технологій, здатних забезпечити сталий економічний розвиток та зниження антропогенного навантаження на довкілля. Одним із перспективних напрямів є агровольтаїка — інтеграція фотоелектричних систем у сільськогосподарські ландшафти з метою одночасного виробництва електричної енергії та вирощування сільськогосподарських культур. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність використання земельних ресурсів, що є надзвичайно актуальним в умовах обмеженості орних земель та посилення впливу кліматичних змін.

Для південних регіонів України, де спостерігається висока сонячна інсоляція та дефіцит вологи, агровольтаїчні системи відкривають нові можливості адаптації сільського господарства до умов аридного клімату. Розміщення сонячних панелей над посівами сприяє зменшенню перегріву ґрунту, зниженню випаровування вологи та створенню сприятливішого мікроклімату для ряду культур. Водночас, вироблення відновлюваної енергії забезпечує додаткові джерела доходів для фермерських господарств та сприяє децентралізації енергетичної системи країни.

Враховуючи геополітичні виклики, руйнування енергетичної інфраструктури та необхідність переходу до енергоефективної економіки, розвиток агровольтаїки в Україні набуває стратегічного значення. Її впровадження дозволить одночасно підвищити стійкість аграрного виробництва, зменшити вуглецевий слід і забезпечити енергетичну незалежність сільських територій. Однак для обґрунтованого впровадження таких систем необхідно здійснювати комплексну еколого-економічну оцінку їх впливу на ефективність сільського господарства, з урахуванням регіональних природно-кліматичних умов, економічних показників і екологічних обмежень. Саме це зумовлює актуальність обраної теми дослідження.

Огляд досліджень та публікацій. Дослідження агровольтаїки започатковане Адольфом Гьотсбергером та Арміном Застровим, які у 1981–1982 роках запропонували концепцію одночасного використання земель для культур та фотогальванічних панелей. Серед сучасних дослідників виділяються Грег Баррон-Гаффорд (вплив затінення на мікроклімат та врожайність) та Дана-Марі Томас з NREL (соціальні аспекти), а також інші ключові вчені: Крістіан Дюпраз (експерименти у Франції), Макс Чжан (агровольтаїка в Нью-Йорку), Федеріко Кастільо (екологічні аспекти в Каліфорнії) та Алессандра Сконьямільйо (дизайн систем в Європі). Ці роботи підкреслюють потенціал агровольтаїки для пошуку оптимальних моделей між енергетичною та продовольчою безпекою в цій магістерській роботі.

Метою дослідження є обґрунтування екологічного впливу агровольтаїчних систем на елементи біорізноманіття, стан ґрунтів та агроекологічні процеси, а також визначення їх ефективності для стійкого землекористування в кліматичних умовах Півдня України.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- проаналізувати принципи функціонування агровольтаїчних систем, їхні переваги, обмеження та критерії синергії між енергетикою й аграрним сектором;
- дослідити міжнародні стандарти агровольтаїки та обґрунтувати потребу в розробленні національних нормативів для України;
- проаналізувати світові тенденції розвитку агровольтаїки та оцінити стан упровадження агровольтаїки в Україні, визначити ключові бар'єри та запропонувати напрями їх подолання;
- вивчити технологічні аспекти встановлення сонячних панелей, фактори впливу на фотоелектричні системи та ефекти затінення на ростові та фізіологічні параметри культур;
- дослідити вплив різних типів панелей та рівнів затінення на мікроклімат, фізіологічні показники, урожайність і якість плодів томатів в кліматичних умовах Півдня України;

- проаналізувати комплексний екологічний вплив агровольтаїчної системи на біорізноманіття, стан ґрунтів і мікроекологічні процеси за результатами моделювання APSIM v2023;

- оцінити енергетичну та економічну ефективність системи, включаючи продуктивність генерації, самоспоживання, експорт електроенергії та коефіцієнт ефективності землекористування (LER);

- розробити заходи з охорони праці, електробезпеки та рекомендації щодо безпечного впровадження агровольтаїчних систем в Україні.

Об'єктом дослідження є агровольтаїчні системи як інтегровані енергетично-аграрні комплекси, що впливають на умови функціонування агроєкосистем, зокрема на стан ґрунтів, біорізноманіття та вирощування культур.

Предметом дослідження є екологічні та агроєкологічні взаємозв'язки між параметрами агровольтаїчних систем та їх впливом на стан ґрунтів, елементи біорізноманіття і ефективність землекористування в агроєкосистемах.

Запропоновані в кваліфіувційній роботі підходи сприятимуть підвищенню енергоефективності аграрного сектору, зменшенню негативного впливу кліматичних змін на врожайність, а також раціональному використанню земельних ресурсів.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АГРОВОЛЬТАЇКИ

1.1. Сутність поняття агровольтаїки

З усіх природних ресурсів вода, енергія та їжа є найважливішими для підтримки життя на Землі. Вода, енергія та продовольство мають спільні проблеми обмеженої доступності, зростання глобального попиту та обмежень сталого розвитку. До того ж, очікується, що ці важливі ресурси зіткнуться зі значним зростанням попиту через швидке зростання населення, щоб задовольнити основні потреби населення [29, с.2]. Дійсно, згідно з прогнозами ООН, населення світу зросте з 8,5 мільярда у 2030 році до 9,7 мільярда у 2050 році та досягне приблизно 10,4 мільярда у 2080-х роках [71, с.9]. Крім того, за даними ФАО, сільськогосподарське виробництво доведеться подвоїти, щоб задовольнити попит у країнах, що розвиваються, тоді як цим країнам доведеться зіткнутися з обмеженнями, пов'язаними зі зростанням конкуренції за доступ до води та енергії, а також з наслідками зміни клімату. З цією метою прогнозується, що виробництво необхідно збільшити на 60% або навіть подвоїти, щоб задовольнити потреби населення в умовах зростання населення та зміною раціону [60, с.38].

Основні обмеження для розвитку сільського господарства пов'язані з доступом до води та енергії для зрошення. Зрошення – це контрольована подача води для сільського господарства через штучні системи для задоволення потреб у воді, які не задовольняються опадами для росту та розвитку сільськогосподарських культур [65, с.78]. Складні та водоефективні методи зрошення значно збільшили потреби в енергії. Велика вартість енергії, яка необхідна для роботи цих систем, ставить під загрозу життєздатність багатьох іригаційних мереж. З цією метою з'явилися нові перспективи, а саме використання відновлюваної енергії в іригаційних системах як альтернатива насосним системам, що працюють на викопному паливі, враховуючи, що висока вартість палива та брак електроенергії, особливо у сільській місцевості, є

факторами, які негативно впливають на функціонування іригаційних систем. Сонячні фотоелектричні панелі використовуються завдяки своїм екологічним перевагам, економічній ефективності та здатності вирішувати проблеми дефіциту та недоступності викопного палива в певних регіонах. Енергетичний сектор зазнав значного та прискореного прогресу з точки зору інновацій, які спостерігаються у використанні відновлюваної енергії. В цілому 20% світового споживання енергії у світі припадає на відновлювані джерела енергії, і близько 30% інвестицій у відновлювані джерела енергії припадає на вітроенергетику та 60% на сонячну енергетику.

Сонячна фотоелектрична енергія стала екологічно чистою та економічно вигідною альтернативою з нижчими витратами на енергію [39, с.75]. Крім того, фотоелектричні панелі є одними з провідних технологій відновлюваної енергетики у світі, і їх вартість протягом багатьох років постійно знижується. Прогнозується, що 25% необхідної електроенергії у 2050 році надходитиме з сонячних фотоелектричних систем, що скоротить викиди CO₂ на 4,9 Гт, що відповідає зменшенню викидів в енергетичному секторі на 21% [63].

Згідно зі звітами Організації Об'єднаних Націй за 2024 рік, понад 1 мільярд людей у світі не мають електроенергії, тоді як 0,8 мільярда людей все ще страждають від голоду та недоїдання. З іншого боку, 92% населення світу матиме електроенергію, тоді як 670 мільйонів людей все ще не матимуть доступу до електроенергії до 2030 року. Брак електроенергії перешкоджає будь-якому розвитку, особливо економіці та здоров'ю людей. Тому необхідно забезпечити безпеку продовольства та енергії, щоб вирішити проблеми, що виникають через зростання населення світу та зміну клімату. Продовольча безпека та енергетика, ймовірно, є двома основними категоріями добробуту для людства в усьому світі.

Згідно з даними Консультативної групи з міжнародних сільськогосподарських досліджень (CGIAR), сільське господарство та сектори харчового ланцюга споживають близько 30% світової енергії, що також сприяє викиду 19–29% парникових газів щорічно [50, с.114]. Причиною таких високих

викидів є використання традиційного палива, яке має значний вплив на навколишнє середовище.

Включення відновлюваної енергії шляхом заміни традиційних джерел може бути рішенням для досягнення вищезазначеної мети. Однак ключовим недоліком систем відновлюваної енергії є те, що вони займають значну частину землі, і більшість земель у світі використовується для виробництва продуктів харчування. Згідно зі звітом про Ціль сталого розвитку 15: життя 2,8 мільярда людей безпосередньо залежить від сільського господарства, що вимагає значної кількості землі. Що стосується покриття земель різними відновлюваними ресурсами, біомаса займає найбільшу площу, тоді як вітер займає менше, ніж сонячна енергія. Серед різних відновлюваних джерел енергії сонячна енергія може займати провідну роль, оскільки йому потрібне лише сонце. За даними Національної лабораторії відновлюваної енергії (NERL), фактична кількість енергії, яку поглинає половина земної поверхні становить приблизно 173 000 ТВт. Ця кількість енергії може легко задовольнити світовий попит на енергію. Таким чином, використання сонячної енергії фотоелектричними системами є вигідним, оскільки вони працюють від сонця і їх можна легко розмістити поблизу джерел споживання. Також під час роботи вони мають низький рівень шуму та не мають негативного впливу на птахів, що дуже поширено у вітровій генерації [44 С. 103]. У 2021 році виробництво сонячної фотоелектричної енергії перетнуло поріг у 1000 ТВт·год, що на 22% більше порівняно з 2020 роком. Наразі сонячна фотоелектрична енергетика становить 60% зростання порівняно з іншими відновлюваними джерелами енергії.

Для виробництва відновлюваної енергії за допомогою фотоелектричних систем найпоширенішим типом інтеграції є наземні фотоелектричні системи. Однак, через значну потребу в землі для встановлення фотоелектричних систем, також розробляються інші варіанти, такі як інтеграція в будівлі, фотоелектричні системи на водній основі та фотоелектричні системи інтегровані в транспортні засоби. Однак, одним із перспективних варіантів є агрофотоелектричні системи (APV) [64]. Це поєднання сільського господарства та фотоелектричних систем.

Концепція полягає у встановленні фотоелектричних систем з використанням землі для сільськогосподарських потреб. Інтеграція фотоелектричних систем із сільськогосподарським виробництвом може бути одним із шляхів підвищення продуктивності земель. Це може викоринити зростаючу конкуренцію за землекористування, зростаючий попит на енергію та продукти харчування в світі. Таким чином, агровольтаїка (або агрофотовольтаїка) є інноваційним напрямом у сфері відновлюваної енергетики, що поєднує виробництво електроенергії з сонячного випромінювання та сільськогосподарське виробництво на одній земельній ділянці. Основна ідея цього підходу полягає у раціональному використанні земельних ресурсів шляхом інтеграції фотогальванічних систем із вирощуванням сільськогосподарських культур чи випасом худоби [36, с.301]. Така форма господарювання забезпечує подвійне використання території, сприяє підвищенню енергоефективності та екологічній сталості аграрного сектору.

Термін «*агровольтаїка*» (англ. *agrivoltaics* або *agrophotovoltaics*) походить від поєднання двох слів — *agriculture* (сільське господарство) та *photovoltaics* (фотовольтаїка). Вперше його запропонував німецький учений Адольф Гьотцбергер у 1981 році, який висунув ідею одночасного використання землі для виробництва сільськогосподарської продукції та генерації сонячної енергії [48, с.57]. Однак практичне впровадження цієї концепції розпочалося лише у XXI столітті, коли зниження вартості фотоелектричних панелей і глобальні кліматичні виклики створили сприятливі умови для її реалізації [37, с.124].

Агровольтаїка розглядається як складова концепції сталого розвитку, що поєднує економічні, енергетичні та екологічні аспекти. Основним принципом її функціонування є досягнення синергії між виробництвом енергії та сільськогосподарською діяльністю [51, с.46]. Це означає, що обидва процеси повинні не конкурувати за ресурси, а взаємно посилювати ефект спільного землекористування. Для цього проводяться дослідження, спрямовані на визначення оптимальної конфігурації розміщення панелей, кута нахилу, висоти встановлення та рівня прозорості матеріалів залежно від виду культур і кліматичних умов [45].

З 2014 року уряди Китаю, Франції, Японії, США та Південної Кореї запровадили нову політику для підтримки APV. У 2020 році, що у світі вже встановлено майже 2200 систем APV загальною потужністю 2,8 ГВт. Отже, технологія АФВ допомагає досягти цілей сталого розвитку, зменшуючи конкуренцію між земельними ділянками, що використовуються для виробництва електроенергії, та земельними ділянками, що використовуються для виробництва продуктів харчування. На рис. 1.1. показано історія розвитку систем APV [34, с.209].

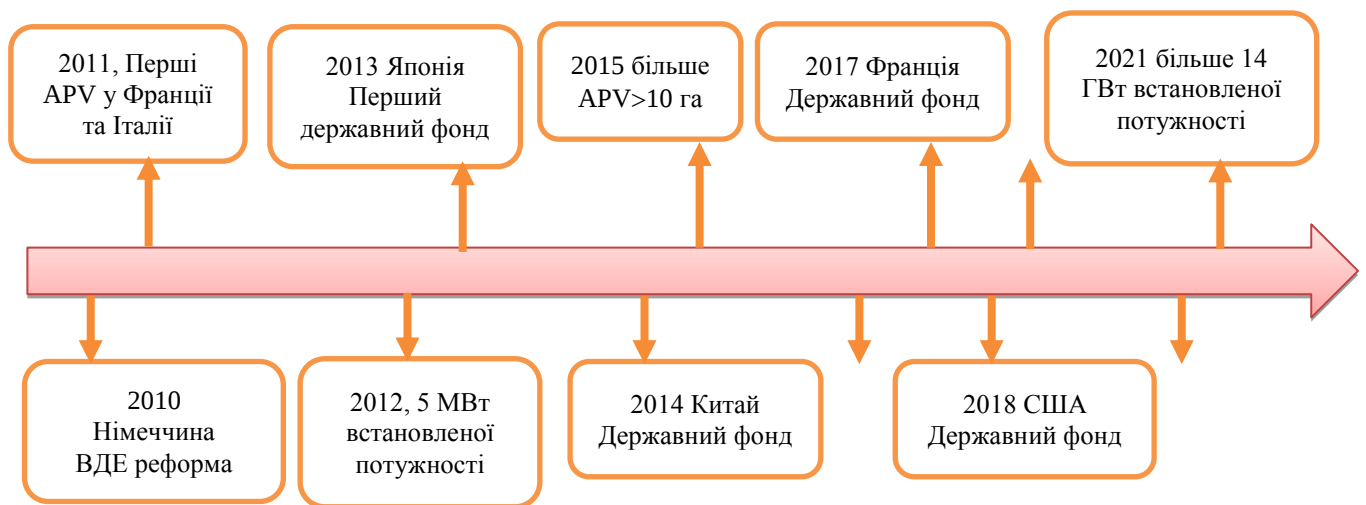


Рис. 1.1. Історія розвитку системи APV

Огляд наукових статей показав, що агровольтаїчні системи також підвищують економічну цінність сільського господарства, генеруючи корисну децентралізовану електроенергію.

Треба зазначити, що система APV повинна впливати одна на одну (фотовольтаїка та сільське господарство). Якщо фотоелектрична установка має прямий вплив на худобу, ґрунт та рослинність, то вона вважатиметься системою. Кілька інших критеріїв також тепер пов'язані з визначенням APV, наприклад, у Німеччині APV дозволена лише в тому випадку, якщо земля дала щонайменше 66% врожайності без сонячної енергії, такий же показник становить 80% у Франції та Японії[17, с.11].

Як згадувалося раніше, перша концепція автономної фотоелектричної системи була розроблена ще в 1982 році, і на той час план полягав у використанні наявного простору під сонячною електростанцією на основі сонячних колекторів

переважно для вирощування сільськогосподарських культур. Сонячні колектори встановлювалися на висоті 2 м над землею та підтримували достатній простір між двома сонячними колекторами, щоб можна було садити сільськогосподарські культури без надмірного затінення. Передбачалося, що одна третина сонячного випромінювання потрібна для сонячного колектора (нахил 48°) через їхню конструкцію, а дві третини сонячного випромінювання можна використовувати для інших цілей, таких як виробництво сільськогосподарських культур. На рис. 1.2. показано типову концепцію системи APV. Для посушливих районів наявність фотоелектричних систем або інших покривних елементів також сприяє покращенню мікроклімату, підвищуючи родючість та вологість ґрунту.

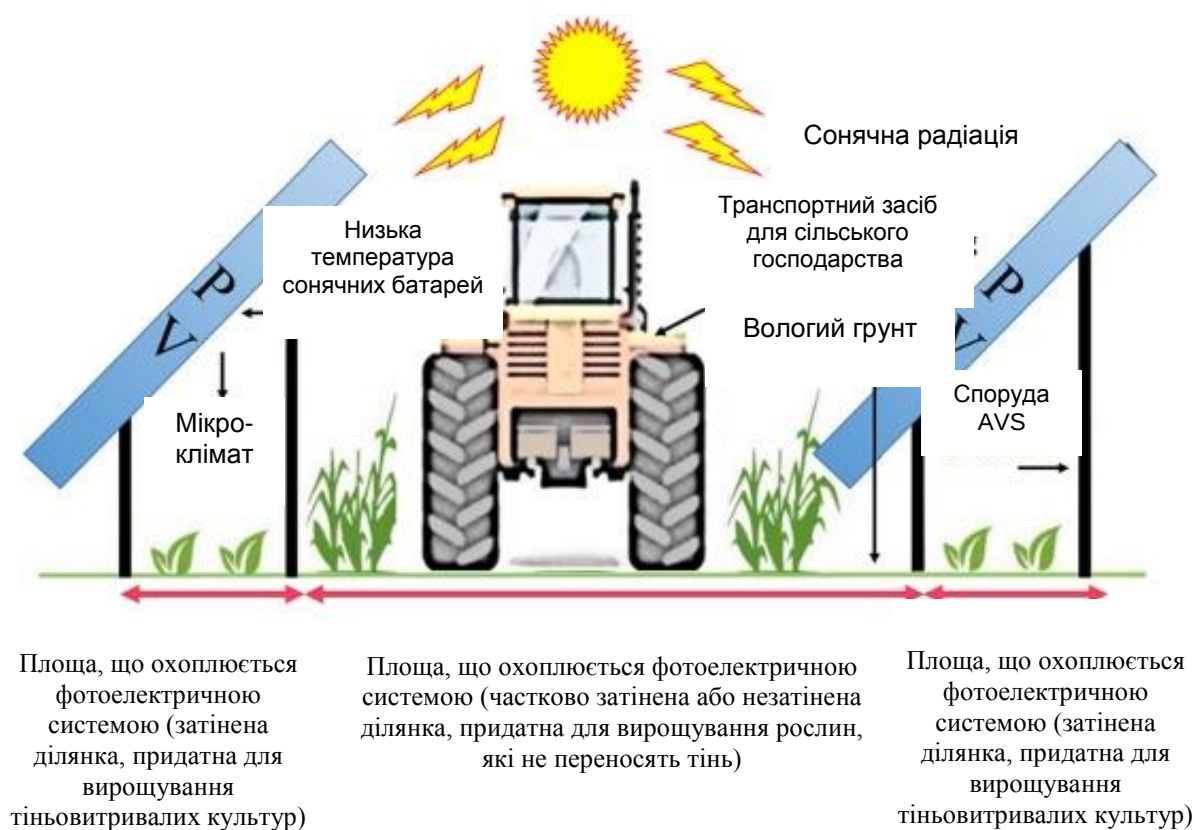


Рис. 1.2. Схема конструкції APV, яка показує простір між панелями, що дозволяє сільськогосподарській техніці та обладнанню проходити між рядами

Одним із ключових показників ефективності агровольтаїки є коефіцієнт еквівалентності земель (Land Equivalent Ratio, LER), який визначає вигоду від поєднання аграрного та енергетичного використання землі. Якщо $LER > 1$,

спільне використання території є ефективнішим, ніж окреме. За даними досліджень Інституту Fraunhofer ISE (Німеччина), LER для агровольтаїчних систем зазвичай коливається у межах 1,2–1,7, що свідчить про зростання ефективності використання земельних ресурсів на 20–70% [15, с.2].

Сучасні системи агровольтаїки оснащуються стаціонарними, одновісними або двоосьовими трекерами, які відстежують положення Сонця. Використання трекерів може підвищити генерацію електроенергії до 40%, однак вимагає додаткових інвестицій і технічного обслуговування [66, с.21]. Вибір типу системи залежить від місцевих умов, культури вирощування, орієнтації рельєфу та економічної доцільності.

Економічна ефективність агровольтаїки базується на диверсифікації доходів і зниженні ризиків, пов'язаних із коливаннями аграрних ринків. За результатами експериментальних досліджень у Німеччині, Італії та США, сукупний дохід від агровольтаїчної ділянки може перевищувати дохід від традиційного землекористування у 1,5–2 рази [57]. При цьому врожайність більшості культур залишається стабільною або навіть підвищується завдяки кращим мікрокліматичним умовам.

З екологічного погляду агровольтаїка сприяє зменшенню антропогенного навантаження на довкілля, скороченню викидів CO₂, збереженню родючості ґрунтів і підвищенню біорізноманіття [1]. Затінення панелями знижує випаровування вологи, що особливо важливо в умовах кліматичних змін і посушливих регіонів. Крім того, агровольтаїчні системи можуть інтегруватися з технологіями крапельного зрошення, системами «розумного фермерства» та зберігання енергії [2].

На сьогодні розвиток агровольтаїки відповідає ключовим цілям сталого розвитку ООН, зокрема Цілям 2 («Подолання голоду»), 7 («Доступна та чиста енергія») і 13 («Боротьба зі зміною клімату»). Вона сприяє продовольчій безпеці, енергетичній незалежності та розвитку «зеленої» економіки. Поєднання виробництва енергії та харчових продуктів на одній території дозволяє оптимізувати землекористування й адаптувати аграрні системи до змін клімату.

У країнах ЄС агровольтаїка вже визнана стратегічним напрямом. У Франції, Німеччині, Італії та Іспанії реалізовано десятки пілотних проєктів, орієнтованих на виноградарство, овочівництво та кормові культури [12, с.23]. У Японії технологія застосовується на рисових полях, де затінення допомагає стабілізувати врожайність і зменшити споживання води. У США агровольтаїка використовується переважно у посушливих районах для зменшення випаровування та підвищення ефективності іригації [72].

Таким чином, агрофотовольтаїка (APV) являє собою поєднання фотовольтаїчних систем та сільськогосподарських угідь, де земля використовується як для виробництва фотоелектричної енергії, так і для виробництва продуктів харчування. Її також можна назвати агровольтаїкою (AB), спільним використанням сонячної енергії, подвійним використанням землі та електрикою.

1.2. Принципи, переваги та недоліки впровадження агровольтаїчних систем

В основі впровадження агровольтаїчних систем лежить концепція подвійного використання земельної ділянки: на одній і тій же площі здійснюється одночасне виробництво електроенергії за допомогою фотоелектричних панелей та сільськогосподарська діяльність – вирощування культур або випас худоби. Такий підхід дозволяє оптимізувати використання земельної площі, що має особливе значення в умовах дедалі зростаючої конкуренції між сільським господарством і генерацією відновлюваної енергії. Наприклад, агровольтаїка дозволяє уникнути конфлікту за землекористування та забезпечує більш раціональне використання площі.

Принципи агровольтаїки базуються на сталому розвитку, де економічна вигода поєднується з екологічним захистом. Отже, головними принципами є [69, с.13]:

Ефективність використання землі: Традиційно земля використовується або для фермерства, або для енергетики. Агровольтаїка дозволяє подвійне навантаження, підвищуючи продуктивність на гектар. Наприклад, коефіцієнт еквівалентності землі (LER), як ми зазначали вище, може сягати 1,2-1,7, що означає на 20-70% вищу ефективність порівняно з моновикористанням.

Синергія між системами: Панелі створюють мікроклімат: затінення зменшує випаровування води (до 30%), захищає від граду чи посухи, а дощова вода з панелей може використовуватися для зрошення. Для культур, як картопля чи бобові, це підвищує врожайність. З іншого боку, рослини охолоджують панелі, збільшуючи їх ефективність на 10-15%[62, с.14].

Екологічна стійкість: Агровольтаїка сприяє зменшенню викидів CO₂, зберігаючи біорізноманіття. Під панелями можна висаджувати квіти для бджіл чи трави для тварин, перетворюючи монокультури на екосистеми. У посушливих регіонах це економить воду, а в холодних – захищає від морозів.

Економічна життєздатність: Фермери отримують додатковий дохід від продажу енергії (до 20-30% від загального), а інвестиції в панелі окупаються за 8-12 років. Держави стимулюють це субсидіями, як в ЄС чи Україні, де принципи включають інтеграцію в національні плани.

Технологічна адаптивність: Принцип гнучкості – системи адаптуються до локальних умов. У Європі фокус на садівництві, в Азії – на рисі, в Україні – на зернових. Використання штучного інтелекту для моніторингу світла та вологості оптимізує процес.

Соціальна відповідальність: Агровольтаїка підтримує малі ферми, створюючи робочі місця в енергетиці та аграрній сфері. Принцип участі громад – проекти впроваджуються з урахуванням думки місцевих жителів [56, с.17].

Інноваційність: Постійний розвиток: від біфаціальних панелей (що ловлять світло з обох боків) до інтеграції з інформаційно обчислювальними технологіями для автоматизації.

Ці принципи роблять агровольтаїку не просто технологією, а філософією сталого землекористування.

Все у світі має свої переваги та недоліки, і агровольтаїка не є винятком.

Незважаючи на це, агровольтаїка набирає популярності. Фермери та дослідники виявили, що виробництво сонячної енергії, сільське господарство та тваринництво добре поєднуються. Мікроклімат, що створюється агровольтаїчною інфраструктурою, корисний як для сільськогосподарських культур, так і для худоби, причому перше фактично підвищує ефективність другого.

Системи APV мають кілька позитивних якостей та складних факторів, як зазначено нижче [47, с.19].

Переваги APV

Продуктивність земель: Комбіноване встановлення може потенційно збільшити продуктивність земель на 20–70% та ширше розподілити супутні вигоди від сільського господарства та виробництва фотоелектричної енергії шляхом продажу електроенергії, оренди землі та вдосконалення виробничих потужностей сільськогосподарського сектору.

Ефективність використання води: більшість сонячних панелей потребують промивання водою, щоб видалити пил з поверхні та підвищити ефективність сонячного випромінювання. Якщо рослини ростуть під фотоелектричними панелями, ту саму воду можна використовувати для зрошення рослин.

Покращення стану ґрунту/менше пилоутворення: Покриття поверхні ґрунту рослинністю запобігає змиванню верхнього шару ґрунту. Це покращує стан ґрунту. Крім того, наявність сільськогосподарських культур під фотоелектричними панелями призводить до меншого пилоутворення з ґрунту.

Низька місцева температура навколишнього середовища: Ведення сільського господарства під фотоелектричними панелями також може підтримувати їх прохолоду завдяки вологому та сирому ґрунту. Часто ця температура нижча за температуру навколишнього середовища, що допомагає виробляти більше енергії з фотоелектричних систем. Наявність фотоелектричних систем забезпечує затінення під фотоелектричними панелями, що покращує баланс випаровування та зрошення.

Зменшення впливу посухи: У харчовому секторі дефіцит води є великою загрозою. Наявність затінення від APV усуває випаровування, що, у свою чергу, покращує врожайність сільськогосподарських культур під час посухи [35, с.9].

Зупиняє міграцію: Цей тип схеми може мати потенціал для соціального розвитку та інтеграції технологій і сільського господарства, а також може створити нові освітні заклади та робочі місця. Міграцію з сільської місцевості до міста можна мінімізувати, оскільки більшість сільськогосподарських угідь знаходиться в сільській місцевості, де слід створювати нові фермерські підприємства.

Людський фактор: Одним із важливих аспектів впровадження агровольтаїчних систем є вплив на умови праці сільськогосподарських працівників. Зокрема, захворювання, пов'язані з надмірним впливом сонячного випромінювання, такі як рак шкіри та тепловий удар, є поширеними ризиками серед фермерів у регіонах із високою сонячною активністю [31, с.850]. Використання агровольтаїчних установок (APV) сприяє зниженню цих ризиків, оскільки конструкції сонячних панелей створюють затінені ділянки, що забезпечують комфортніші умови праці та зменшують теплове навантаження на організм працівників. Таким чином, APV-технології не лише підвищують ефективність землекористування, але й мають позитивний соціальний ефект, покращуючи безпеку та умови праці в аграрному секторі.

Тваринництво: тваринництво в APV також може бути ще одним потенціалом. Хоча часто вважається, що тварини не можуть бути потенційним варіантом для сільськогосподарських угідь. Однак, як тільки врожай повністю виросте або дозріє, його зрізають та збирають. Таким чином, після збору врожаю землю можна легко використовувати для випасу тварин. Якщо продуктивність земель оцінювати за допомогою фотоелектричної генерації, а м'ясо виробляти з овець, кроликів, ягнят та ему, то загальний прибуток від чистої енергії та ціни на м'ясо буде величезним [11].

Джерело зарядної станції для електромобілів: Електрифікація транспортного сектору також може отримати вигоду від використання

автономних електромобілів. Тривога щодо запасу ходу є ключовою проблемою для користувачів, які використовують електромобілі для подорожей на далекі відстані, особливо в сільській місцевості. Найчастіше в цих місцях зарядні станції для електромобілів відсутні. Якщо APV буде розгорнуто, це може бути джерелом енергії для зарядної станції для електромобілів. Отже, в майбутньому люди будуть більш схильні використовувати електромобілі для поїздок на відпочинок та інших поїздок за місто [20, с.11].

Джерело енергії для електрифікації сільських районів поза мережею/без неї: У світі більшість сільськогосподарських угідь розташовані в сільській місцевості, а сільське населення позбавлене електричної інфраструктури. ООН встановила ціль щодо доступної електроенергії, щоб сільські райони більше не були позбавлені енергії. У цьому контексті автономні фотоелектричні системи (АПВ) можуть мати потенціал як джерело електрифікації сільських районів. АПВ можуть бути основним джерелом автономних систем у сільській місцевості.

Недоліки APV

Втрати сільськогосподарських угідь: Для APV, незалежно від планування, деякі втрати сільськогосподарських угідь очевидні. Однак обсяг втрат залежить від культури та розміру панелі. Більшість традиційних панелей мають прямокутну форму, тому важко стверджувати, що ця конкретна форма може вмістити на всю землю, оскільки розмір, габарити та форма землі значно відрізняються залежно від місця.

Збільшення вартості робочої сили: APV вимагає технічних знань, що включають знання сонячної фотоелектричної енергії та знання сільського господарства. Фермерам бракує знань про сонячну фотоелектричну енергію, тоді як люди, які є експертами в сонячній енергетиці, не можуть вирішити проблеми, пов'язані з врожаєм. Таким чином, витрати на робочу силу будуть включатися щоразу, коли виникає будь-яке технічне обслуговування або потреба вирощувати нові культури. Для експлуатації та обслуговування системи APV потрібні два різні типи експертів, які можуть працювати разом. У цьому аспекті уряд повинен

втрутитися та забезпечити схему, за якою можна буде підготувати конкретних експертів з APV [32, с.850].

Цикл вирощування культур: Для підвищення врожайності сільськогосподарських культур, як правило, всі сільськогосподарські угіддя змінюють покоління культур. Якщо одне й те саме сільськогосподарське плантування застосовується рік за роком, це матиме вплив на цю ділянку поля. Таким чином, сівозміна культур є важливим компонентом APV. Отже, для цього аналіз врожайності сільськогосподарських культур необхідно проводити для різних культур перед застосуванням APV.

Не підходить для використання в теплицях: фотоелектричні панелі (АПВ) для теплиць блокують проникнення світла. Це часто може уповільнити ріст культури. У рамках однієї конкретної роботи повідомлялося, що використання непрозорої теплиці з фотоелектричним покриттям призвело до зниження врожайності на 64% [46].

Протизабруднювальне покриття: слід пам'ятати, що якщо для фотоелектричних систем (APV) використовуються фотоелектричні панелі, будь-яка хімічна речовина, що використовується для протизабруднювального покриття, може завдати шкоди врожаю. Таким чином, це не такий простий підхід як наземні панелі, де ключовими критеріями є низький показник заломлення та високий коефіцієнт пропускання світла для протизабруднювального покриття. Однак вважається, що система APV стикається з меншими проблемами пилу, ніж типові наземні або інтегровані в будівлі, оскільки рослини допомагають зупинити ерозію ґрунту.

Вплив фотоелектричних панелей (АПВ) на екологію: хоча сонячне скло має високий коефіцієнт пропускання, його відбиття становить близько 4% або більше. Оскільки фотоелектричні панелі можуть відбивати поляризоване світло, птахи часто помилково сприймають їх як джерело води. Через падіння на тверді та теплі поверхні вони найчастіше гинуть або травмуються. Деяких комах приваблює поляризоване світло. Повідомляється про значно високу смертність

птахів, що також включало фотоелектричні та концентровані сонячні системи [61, с.604].

Таким чином, впровадження агровольтаїчних систем базується на принципах оптимізації спільного використання земельних, енергетичних та аграрних ресурсів за рахунок поєднання сонячної генерації та сільськогосподарського виробництва. Ця модель має численні переваги — підвищення загальної продуктивності землекористування, зниження витрат водних ресурсів, підвищення енергоефективності, диверсифікація доходів і екологічна стійкість. Однак на практиці її застосування обмежується високими капітальними витратами, узгодженням з агрокультурами, необхідністю адаптації агротехнологій, а також регуляторними та земельно-ресурсними бар'єрами. Успішна реалізація АВ-систем вимагає комплексного підходу — врахування агроекологічних умов, технічного проектування, адаптації агротехнологій та відповідної політичної підтримки.

1.3. Стандарти для агровольтаїки та їх адаптація в Україні

Необхідність стандартів для агровольтаїки обумовлена кількома факторами. По-перше, відсутність уніфікованих норм може призводити до неефективного використання ресурсів, ризику для сільськогосподарського виробництва (наприклад, через неправильне затінення культур) та потенційних екологічних проблем. По-друге, стандарти забезпечують безпеку, сумісність обладнання та економічну вигідність проектів. На міжнародному рівні стандартизація допомагає гармонізувати практики між країнами, сприяючи глобальному поширенню технології. В Європі та США вже розробляються спеціальні рекомендації, тоді як в Україні цей процес перебуває на початковій стадії, з акцентом на адаптацію міжнародних норм [73, с.14].

Ерім того, різниця між агрофотоелектричними системами та звичайними наземними сонячними системами не завжди очевидна на перший погляд, оскільки обидві технології використовують сонячні модулі на відкритих майданчиках. Щоб уникнути зловживань і плутанини, були розроблені чіткі рекомендації та

стандарти, які визначають, що є справжньою агровольтаїчною системою. Ці визначення викладені в німецькому стандарті DIN SPEC 91434, який був розроблений широким консорціумом компаній, фермерів, дослідницьких організацій та асоціацій [43, с.51].

DIN SPEC 91434 містить точні специфікації щодо того, як основне сільськогосподарське використання повинно зберігатися, незважаючи на встановлення сонячних модулів. Основна мета цього стандарту - забезпечити, щоб сільськогосподарське виробництво не просто виконувало функцію алібі для отримання субсидій, але й фактично продовжувалося. Тільки якщо сільськогосподарське виробництво гарантується протягом усього періоду, система вважається справжньою агрофотовольтаїчною системою.

У той час як DIN SPEC 91434 зосереджується, в першу чергу, на вирощуванні сільськогосподарських культур, у червні 2023 року було опубліковано додатковий стандарт DIN SPEC 91492, який визначає конкретні вимоги до тваринництва в системах агроводопостачання. Це розширення показує, що агровольтаїка є перспективним рішенням не тільки для вирощування рослин, але й для тваринництва. Разом ці два стандарти створюють комплексний набір правил, який забезпечує гармонізацію сільськогосподарського використання та виробництва сонячної енергії [70, с.16].

Міжнародна стандартизація агровольтаїки переважно базується на існуючих нормах для фотовольтаїчних систем, адаптованих до аграрного контексту. Провідною організацією є International Electrotechnical Commission (IEC), яка об'єднує 174 країни та понад 30 000 експертів. IEC Technical Committee 82 (TC 82) розробив близько 200 стандартів для компонентів PV-систем, таких як модулі, інвертори, трекери та конектори. Ці стандарти, наприклад IEC 61215 та IEC 61730 для PV-модулів, а також IEC 61724-1 для сенсорів іригації, вважаються достатніми для агровольтаїки без потреби в нових спеціалізованих нормах на поточному етапі.

IEC TC 47 займається стандартами для сенсорів, що є критичними для агровольтаїки, оскільки вони дозволяють оптимізувати системи для максимізації врожайності культур. Наприклад, стандарт IEC 62969-1 визначає вимоги до

інтерфейсів живлення для сенсорів, які можуть застосовуватися в сільськогосподарських тракторах. Крім того, IECQ та IECCE забезпечують оцінку якості та сертифікацію компонентів, що гарантує відповідність міжнародним нормам [67, с.33].

Іншою важливою організацією є Solar Power Europe, яка видала Agrisolar Best Practice Guidelines (Версія 2, 2023). Ці рекомендації спрямовані на стале впровадження Agri-PV, з акцентом на концепцію Sustainable Agricultural Concept (SAC). SAC включає тризіркову систему бенчмаркінгу, яка оцінює проекти за критеріями стійкості, такими як ефективність використання землі, води та природних ресурсів, підвищення врожайності, здоров'я ґрунтів та біорізноманіття. Рекомендації підкреслюють необхідність планування на ранніх стадіях, включаючи дизайн, будівництво та експлуатацію, для оптимізації подвійного використання землі.

У США Національна лабораторія відновлюваної енергії (NREL) досліджує агровольтаїку як поєднання сонячної енергії з сільським господарством, включаючи вирощування культур, пасовища та створення середовищ для запилювачів [40, с.18].

NREL підкреслює переваги, такі як захист рослин від екстремальної погоди за допомогою підвищених систем (панелі на висоті щонайменше 6 футів). Співпраця між American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) та Solar Energy Industries Association (SEIA) спрямована на розробку нових стандартів, починаючи з спільної термінології та визначень для проектів на сільськогосподарських землях. Ці стандарти охоплюють дизайн, будівництво та експлуатацію, зменшуючи ризики для фермерів та знижуючи витрати.

В Європі агровольтаїка активно розвивається, з великими комерційними проектами потужністю до 50 МВт. Solar Power Europe рекомендує використовувати модульно-рівневі електронні пристрої для безпеки в Agri-PV установках, як вказано в AgriSolar Best Practices Guidelines. Ці рекомендації включають захист від пожеж, електробезпеку та адаптацію до аграрних умов, таких як захист кабелів від тварин.

Німецький стандарт DIN SPEC 91434 є одним з перших спеціалізованих для агровольтаїки. Він визначає мінімальні характеристики та вимоги до фотовольтаїчних систем для одночасного використання з сільським господарством. Стандарт охоплює інтегровані системи для сонячної енергії та аграрних земель, з акцентом на ефективність та сталість. У Франції, Італії та інших країнах пілотні проекти демонструють синергію між фотосинтезом та фотовольтаїкою, з використанням трекерів для динамічного затінення [33, с.8].

Європейські рекомендації також акцентують на інноваціях, таких як вертикальні біфасіальні системи в Норвегії та Великій Британії, які вирішують конфлікти земельного використання в регіонах з обмеженими ресурсами. У напівпосушливих регіонах, як Індія, агровольтаїка зменшує тепловий стрес для культур та робітників, підвищуючи продуктивність панелей за рахунок охолодження [53, с.26].

У США агровольтаїка розглядається як інструмент для збереження сільськогосподарських земель. Факт-лист від American Clean Power Association (ACPA) описує ключові міркування для колокалізації сонячної енергії та сільського господарства. Проекти включають пасовища для дрібної худоби, вирощування культур, середовища для запилювачів та бджільництво. Рекомендації підкреслюють оцінку за місцем, з урахуванням розміру, конфігурації та економічної доцільності.

Для пасовищ панелі підвищуються, а кабелі захищаються, що збільшує витрати, але забезпечує стабільність під час екстремальної погоди. Для культур рекомендуються низькорослі рослини в частковому затіненні, з міжрядковим або підвищеним розміщенням. Широкі інтервали між рядами дозволяють використовувати техніку, але зменшують щільність енергії. Стандарти не є обов'язковими, але програми штатів, як SMART у Массачусетсі чи пілот у Нью-Джерсі, підтримують дослідження.

American Farmland Trust (AFT) видає рекомендації щодо політики для просування агровольтаїки, з фокусом на фермеро-центричне визначення та стимули для збереження землі в виробництві. Дослідження показують, що

агровольтаїка може генерувати значну цінність для запилення, до \$164 млн у вивчених штатах [54, с.12].

В Україні ж агровольтаїка розвивається як частина відновлення економіки після конфліктів. Асоціація Агровольтаїки України аналізує застосування міжнародних стандартів, таких як DIN SPEC 91434, для регулювання систем. Успішне впровадження вимагає гармонізації національних норм з міжнародними, включаючи нормативно-правові аспекти стимулювання.

Стратегія розвитку агровольтаїки, розроблена Таврійським національним університетом, включає напрямки наукових досліджень, такі як гармонізація стандартів з міжнародними нормативами. Це охоплює оцінку потенціалу, моделювання систем та правові аспекти. Пілотні проекти в Україні фокусуються на захисті культур від спеки та заробітку на "тіні", за прикладами з Європи та Азії.

Однак, необхідно розробити національні стандарти, що враховують кліматичні умови України, такі як посушливість у південних регіонах. Інтеграція з державними програмами, як воркшопи від Державного агентства з енергоефективності, сприяє підвищенню енергоефективності в агробізнесі [5, с.4].

Основні виклики включають високі інвестиційні витрати, ризики пошкодження панелей технікою та вплив динамічного затінення на рослини. Дослідження Fraunhofer ISE показують, що сенсори та аналітика даних можуть оптимізувати системи, але потребують стандартизації. У посушливих регіонах агровольтаїка збільшує придатність земель до 31 712 км² за прогнозами.

Перспективи включають інновації, як клімат-контрольовані системи для безпечного виробництва їжі, з рекомендаціями щодо дизайну для збереження землі та ресурсів. Майбутні стандарти можуть фокусуватися на специфічних аспектах, як захист від тварин чи інтеграція з тракторами [6].

Таким чином, розвиток агровольтаїки як інноваційного напрямку поєднання виробництва відновлюваної енергії та сільського господарства потребує впровадження чіткої системи стандартизації, що забезпечить її ефективність, безпеку та сталість. Стандарти виконують ключову роль у визначенні вимог до технічних параметрів, екологічних характеристик, а також у регулюванні

взаємодії між енергетичною та аграрною складовими. Вони сприяють оптимізації використання земельних ресурсів, підвищенню довіри інвесторів та мінімізації потенційних ризиків для фермерів і довкілля.

Аналіз міжнародного досвіду свідчить, що формування нормативної бази агровольтаїки вже відбувається у провідних країнах світу. Для України питання стандартизації агровольтаїки має особливе значення у контексті післявоєнного відновлення економіки, продовольчої безпеки та енергетичної незалежності. Національні ініціативи, зокрема діяльність Асоціації агровольтаїки України та наукові дослідження Таврійського національного університету, спрямовані на адаптацію міжнародних стандартів до вітчизняних умов. Однак, відсутність єдиних державних норм залишається суттєвим бар'єром для масштабного впровадження технології.

Подальший розвиток агровольтаїки в Україні потребує розроблення національних стандартів, що враховуватимуть кліматичні, агротехнічні та економічні особливості регіонів, зокрема Півдня України. Необхідно передбачити вимоги до проєктування, експлуатації та безпеки систем, інтегрованих із сільським виробництвом, а також регламентувати показники ефективності подвійного використання земель. Важливими є також стандарти для систем моніторингу, сенсорних технологій та кібербезпеки в агровольтаїчних комплексах [1].

Отже, стандартизація є стратегічним інструментом розвитку агровольтаїки, який забезпечує технічну уніфікацію, правову визначеність та екологічну сталість. Формування національної системи стандартів, узгодженої з європейськими та міжнародними вимогами, стане передумовою для інтеграції України в глобальний ринок «зеленої» енергетики, сприятиме раціональному використанню земельних ресурсів і підвищенню конкурентоспроможності аграрного сектору.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ АГРОВОЛЬТАЇКИ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ

2.1. Світові тенденції розвитку агровольтаїчних технологій

Історія агровольтаїки бере початок з 1980-х років, коли вчені в Європі та Азії вперше запропонували ідею поєднання сонячних панелей з сільським господарством. Піонерськими роботами стали експерименти в Німеччині, де Адольф Гетцбергер у 1981 році описав концепцію «подвійного використання землі» для фотовольтаїки та рослинництва. У 2000-х роках Японія стала лідером: після Фукусімської катастрофи 2011 року уряд запровадив програму «сонячного спільного використання», стимулюючи встановлення панелей над рисовими полями [48, с.55].

З 2010-х років тенденції набули глобального масштабу. У Китаї розпочалися масові проекти: до 2020 року встановлено понад 2 ГВт потужностей на сільгоспземлях. Європа приєдналася з ініціативами ЄС: Франція у 2017 році прийняла закон про «агровольтаїзм», а Німеччина – про «Agri-PV». У США розвиток почався з проектів на пасовищах, де панелі поєднуються з випасом тварин.

Світові тенденції еволюціонували від експериментальних установок до комерційних ферм. Зростання ринку стимулюється падінням вартості панелей (на 80% з 2010 року) та глобальними кліматичними угодами, як Паризька угода 2015 року. Сьогодні агровольтаїка – частина стратегій «Зелений курс» ЄС та «Net Zero» у США [1].

Сьогодні Європа є одним з лідерів у розвитку агровольтаїчних технологій, фокусуючись на екологічній стійкості та інтеграції з аграрною політикою. У Франції тенденція – надземні системи над виноградниками та садами: до 2023 року встановлено понад 500 МВт, з підтримкою держави через субсидії до 30%

вартості. Принцип «агрівольтаїзму» вимагає збереження 90% врожайності, що стимулює інновації в напівпрозорих панелях.

Німеччина акцентує на орному землеробстві: проекти "Agri-PV" на картоплі та зернових показують зростання врожайності на 10-20% завдяки затіненню. У 2022 році прийнято закон про "подвійне використання", з планами на 4 ГВт до 2030 року. Італія розвиває гібридні системи в Середземномор'ї: панелі над оливковими гаями зменшують випаровування води на 40%, з акцентом на біфаціальні модулі [34, с.207].

У Нідерландах тенденція – інтеграція з теплицями: закриті системи генерують енергію для освітлення, зменшуючи витрати на 25%. Загалом, європейські тенденції – регуляторна підтримка (ЄС субсидії), фокус на біорізноманіттю та стандартизація (норми DIN SPEC 91434). Зростання ринку – 30% щорічно, з інвестиціями в R&D понад 1 млрд євро.

Також у Європі агрофототехніка показала, що часткове затінення сонячними панелями може зменшити випаровування, тим самим покращуючи утримання води в культурах, що особливо вигідно в районах з обмеженими водними ресурсами. Ці системи не лише оптимізують використання сільськогосподарських угідь, але й зменшують конкуренцію між виробництвом енергії та виробництвом продуктів харчування, забезпечуючи сталі рішення для регіонів з дефіцитом землі [38, с.2726].

На сьогодні Азія домінує в глобальному ринку агровольтаїки, з акцентом на масові проекти з адаптації до змін клімату. Китай лідирує з 14 ГВт встановленої потужності: тенденція – гігантські ферми на пустельних землях, де панелі над культурами зменшують ерозію ґрунту. У 2023 році запущено проект "PV+" на 1 ГВт у провінції Ганьсу, поєднуючи з вирощуванням женьшеню.

Також в Японії та Південній Кореї, агрофототехніка використовується для підвищення продуктивності сільського господарства та задоволення зростаючого попиту на енергію. Ці країни продемонстрували, що сільськогосподарські культури можуть процвітати під сонячними панелями, отримуючи користь від помірних температур та зменшення втрат води.

Японія фокусується на малих системах: понад 4000 ферм з панелями над рисом, де "сонячне спільне використання" підвищує ефективність на 15%. Тенденція – тонкі плівкові панелі для рівномірного світла, з державними субсидіями до 50%. Індія розвиває агровольтаїку в посушливих регіонах: проекти на 2 ГВт над каналами зрошення зменшують втрати води на 30%, з планами на 10 ГВт до 2030 року [30, с.341].

У Кореї тенденція – пенсійні схеми для фермерів: панелі над пасовищами генерують дохід для пенсіонерів, з 10 ГВт планами до 2030. Азійські тенденції – масштабування (Китай), адаптація до мусонів (Індія) та соціальна орієнтація (Японія). Ринок зростає на 40% щорічно, з інвестиціями в напівпрозорі технології.

У Північній Америці тенденції фокусуються на екстенсивному фермерстві та біорізноманіття. США лідирують з проектами «полівольтаїки»: панелі над пасовищами для овець, де тінь підвищує врожайність трав на 20%. У 2023 році встановлено 5 ГВт, з підтримкою програми SMART у Массачусетсі. Тенденція – міжрядні системи з трекінгом, інтегровані з бджільництвом.

Канада розвиває агровольтаїку в холодному кліматі: панелі над ягодами захищають від морозів, з проектами на 500 МВт. У Латинській Америці, зокрема Чилі, тенденція – пустельні ферми: панелі над овочами зменшують випаровування, з 1 ГВт потужностями. Бразилія інтегрує з кавовими плантаціями.

Американські тенденції – акцент на екосистемах (захищені запилювачі), приватні інвестиції (Tesla та фермери) та стандарти (USDA норми). Ринок зростає на 25%, з фокусом на гібридні моделі.

Також у Сполучених Штатах та Австралії були створені великомасштабні агровольтаїчні системи для підтримки як сільськогосподарського, так і енергетичного виробництва, що є моделлю того, як країни, що розвиваються, можуть використовувати цю технологію для сталого зростання [32, с.849].

Незважаючи на глобальні досягнення, впровадження агровольтаїчних систем в Африці залишається обмеженим. Континент стикається зі значними проблемами як у сільськогосподарському, так і в енергетичному секторах, понад 600 мільйонів людей не мають доступу до електроенергії, особливо в країнах

Африки на південь від Сахари. Значна залежність регіону від традиційного сільського господарства та викопного палива ще більше посилює деградацію навколишнього середовища, продовольчу небезпеку та кліматичну вразливість, що робить інтеграцію систем відновлюваної енергії вирішальною. Африка, з її величезними земельними ресурсами та високим рівнем сонячної радіації, має величезний потенціал для розгортання агроелектрикальних систем. Країни Північної та Східної Африки, такі як Марокко та Кенія, почали досліджувати потенціал поєднання виробництва сонячної енергії із сільським господарством [20, с.31].

Міжнародне агентство з відновлюваної енергії (IRENA) зазначає, що лише 23% загальної потужності електроенергії Африки отримується з відновлюваних джерел, порівняно із середнім світовим показником 28%, що відображає відставання регіону у впровадженні технологій відновлюваної енергії [55, с.42]. Сільське господарство відіграє вирішальну роль в економіці Африки, залучаючи близько 65% робочої сили континенту та створюючи майже третину його ВВП. Однак, продуктивність сільського господарства залишається низькою через такі фактори, як обмежений доступ до сучасних сільськогосподарських технологій, дефіцит води та деградація земель. Інтеграція агрофольгатики може значно підвищити продуктивність сільського господарства, забезпечуючи стійку енергію для зрошення та інших видів сільськогосподарської діяльності, одночасно виробляючи електроенергію для сільських громад, які не підключені до мережі. Однією з основних проблем у впровадженні агровольтаїки в Африці є фінансові та інфраструктурні обмеження, з якими стикаються багато країн. Багато африканських країн, включаючи Нігерію, борються з недостатніми інвестиціями в інфраструктуру відновлюваної енергетики, що обмежує масштабованість таких технологій, як агрофольгатики. Крім того, відсутність чітких регуляторних рамок та політики, що підтримують інтеграцію сільського господарства та відновлюваної енергетики, ще більше перешкоджає прогресу.

Світові тенденції розвитку включають технологічні інновації. Біфаціальні панелі (ловлять світло з обох боків) підвищують ефективність на 15-20%,

популярні в Європі. Напівпрозорі модулі з перовскіту, які пропускають 70% світла для культур, тестуються в Азії [67, с.8].

Трекінг-системи зі штучним інтелектом оптимізують кут нахилу, зменшуючи затінення – тенденція в США. Інтеграція з зрошенням: панелі збирають дощову воду, зменшуючи витрати на 30%. У Європі розвивають вертикальні панелі для садів, де вони не займають ґрунт.

Гібрид з акумуляторами: енергія зберігається для нічного освітлення теплиць. Інновації – екологічні панелі з біорозкладних матеріалів, зменшуючи відходи.

Світові тенденції розвитку агровольтаїчних технологій – це швидке зростання, регіональна адаптація та інновації. Від масових проєктів Китаю до екологічних ферм США, агровольтаїка стає глобальним трендом. Попри виклики, перспективи позитивні: вона вирішить проблеми їжі, енергії та клімату. В Україні впровадження агровольтаїки – шлях до стійкості та економічного зростання. У майбутньому наша держава може стати лідером у Європі з агровольтаїки, з потенціалом 5 ГВт на зернових полях.

Таким чином, агровольтаїка еволюціонувала від концептуальних досліджень 1980-х років до масштабного глобального тренду, що поєднує енергетичну та продовольчу безпеку. У світі, де кліматичні зміни, урбанізація та зростання населення посилюють тиск на орні землі, агровольтаїка стає стратегічним інструментом для сталого розвитку. Її розвиток демонструє поступову інтеграцію технологічних, екологічних і соціально-економічних аспектів. Сучасні тенденції характеризуються регіональною диференціацією: Європа орієнтується на регуляторну підтримку та збереження врожайності, Азія — на масштабування і кліматичну адаптацію, Північна Америка — на біорізноманіття та екосистемні підходи, тоді як Африка лише розпочинає процес інтеграції через структурні бар'єри. Водночас технологічні інновації, такі як біфаціальні панелі, напівпрозорі модулі з перовскіту та II-керовані трекінг-системи, формують нову парадигму ефективного землекористування [49, с.16].

Агровольтаїчні системи довели свою ефективність у підвищенні врожайності, зниженні випаровування вологи та стабілізації мікроклімату [38, с.2729]. Їх впровадження сприяє досягненню цілей сталого розвитку ООН, Паризької кліматичної угоди та Європейського зеленого курсу. Попри нерівномірність регіонального прогресу, світова динаміка зростання ринку (25–40% щорічно) засвідчує перехід агровольтаїки від експериментальної до стратегічної складової енергетичної трансформації. Для України дана технологія має високий потенціал як інструмент підвищення енергоефективності агросектору, диверсифікації економіки та зміцнення продовольчої безпеки у контексті кліматичних викликів XXI століття.

2.2. Стан і перспективи впровадження агровольтаїки в Україні

В Україні агровольтаїка перебуває на початковому етапі розвитку, проте демонструє прискорене зростання в умовах енергетичної кризи, зумовленої збройним конфліктом, та значного аграрного потенціалу країни. Перші наукові згадки про цю технологію з'явилися в публікаціях наприкінці 2010-х років, коли Україна активно впроваджувала «зелений» тариф для стимулювання сонячної енергетики, що сприяло інтеграції відновлюваних джерел енергії в аграрний сектор [7]. За даними Міністерства енергетики України, протягом 2024–2025 років було додано 800–850 МВт сонячної потужності, переважно для самоспоживання, з акцентом на агровольтаїчні системи [13, с.3]. Цей розвиток є відповіддю на глобальні тенденції, де агровольтаїка розглядається як інструмент для досягнення цілей сталого розвитку в умовах кліматичних змін.

Одним з перших помітних кроків у впровадженні агровольтаїки в Україні стало створення експериментальних установок у південних регіонах, де кліматичні умови (високий рівень сонячної інсоляції та тривалий вегетаційний період) сприяють ефективній роботі сонячних панелей. Наприклад, у Херсонській області було реалізовано проект з встановлення сонячних панелей над виноградниками, де конструкції забезпечували часткове затінення, зменшували

випаровування вологи на 20-30% та підвищували врожайність на 10-15% за рахунок створення сприятливого мікроклімату [36, с.301]. Цей ініціативний проект, ініційований приватними компаніями за підтримки грантів від Європейського Союзу, ілюструє синергетичний ефект між енергетикою та виноградарством, дозволяючи фермерам диверсифікувати доходи від продажу електроенергії та сільгосппродукції. Однак, через воєнні дії 2022–2025 років, значна частина таких установок зазнала пошкоджень або була демонтована, що вимагає комплексної повоєнної відбудови з урахуванням підвищених стандартів стійкості до зовнішніх загроз [4, с.19].

Ключовими проектами в Україні є Ганська сонячна електростанція (СЕС) у Житомирській області, де інтегровано сонячні панелі з вирощуванням ягід та випасом овець, та проекти компанії UTEM SOLAR потужністю 1,7 МВт для агрокомпаній. Зокрема, ТОВ «Тесла Енерго», яке спеціалізується на будівництві та обслуговуванні промислових сонячних електростанцій, реалізувало модель, де під панелями Ганської СЕС влітку випасають овець, що забезпечує природне скошування трави, зменшуючи витрати на утримання території майже до нуля [68, с.12]. Поруч за огорожею вирощують лохину, а сонячна енергія використовується для зрошення, що демонструє практичну інтеграцію агровольтаїки в тваринництво та рослинництво. Цей досвід, єдиний на сьогодні в Україні, відповідає європейським тенденціям, де агровольтаїка не зменшує придатність земель більш ніж на 15% і сприяє адаптації до кліматичних змін, таких як посухи та екстремальні температури [41]. Специфіка сонячних станцій полягає в необхідності регулярного скошування трави під панелями для запобігання пожежним ризикам, оскільки контакт рослин з панелями може призвести до загоряння; підвищення конструкцій для уникнення цього збільшує витрати, роблячи систему менш економічно вигідною. Крім того, відповідно до європейської політики ESG (Environmental, Social, Governance), використання хімічних речовин для контролю рослинності заборонено, що робить біологічні методи, як випас овець, оптимальним рішенням [43, с.38].

Національна академія аграрних наук України (НААН) спільно з Міністерством аграрної політики та продовольства розпочала дослідження агровольтаїки на орних землях у 2023–2024 роках. Пілотний об'єкт у Київській області поєднує сонячні панелі з вирощуванням зернових культур, де надземні конструкції дозволяють безперешкодне використання сільськогосподарської техніки. Результати експериментів показують, що врожайність пшениці під панелями не знижується, а в посушливі періоди навіть зростає на 5-10% завдяки стабілізації мікроклімату та зменшенню випаровування [42]. Значну роль відіграють міжнародні ініціативи, такі як конференція «Стратегія розвитку агровольтаїки: стан, виклики та кроки впровадження в Україні», яку було проведено 8 квітня 2025 року за підтримки Міністерства освіти і науки України. Дана конференція показала, що обговорення питань рослинництва, публічного управління та енергетики з метою формування національної стратегії допоможе прискорити розвиток агровольтаїки, інтегрувати відновлювану енергію в агросектор і адаптувати науку до сучасних викликів, зокрема зміни клімату [1]. Крім того, проекти в Одеській області інтегрують агровольтаїку з тепличним господарством, де панелі генерують енергію для освітлення та опалення, забезпечуючи енергетичну автономію в умовах нестабільної мережі [66, с.17].

Станом на 2025 рік, загальна потужність агровольтаїчних установок в Україні оцінюється в 100-200 МВт, переважно в південних і центральних регіонах, з лідерством приватних компаній, таких як SIG Energy, які пропонують комплексні рішення для ферм, поєднуючи сонячні панелі з системами зрошення [66, с.22]. Асоціація Агровольтаїки України, створена в серпні 2024 року, активно працює над впровадженням, дослідженням та популяризацією технології, налагоджуючи співпрацю з міжнародними партнерами та лобіюючи удосконалення законодавства [1] (див. Додаток А). Ці ініціативи підкреслюють перехід від ізольованих пілотів до системного розвитку, з акцентом на адаптацію до поствоєнних реалій, де агровольтаїка сприяє відновленню енергетичної інфраструктури та підвищенню стійкості аграрного сектора.

Розвиток агровольтаїки в Україні регулюється низкою нормативно-правових актів, зокрема Законом України «Про альтернативні джерела енергії» від 2003 року з поправками 2023 року, який визначає механізми стимулювання відновлюваних джерел, та «зеленим» тарифом, що забезпечує фіксовану оплату за вироблену енергію на рівні близько 0,15 євро/кВт·год [2, с.7]. У 2024 році внесено зміни до Земельного кодексу України, що дозволяють подвійне використання земель для енергетики та сільськогосподарського виробництва за умови збереження родючості ґрунту та мінімального впливу на екосистему [3, с.5]. Міністерство енергетики запровадило субсидії до 30% на агровольтаїчні проекти через Фонд декарбонізації, який надає пільгові кредити для інтеграції сонячних електростанцій на сільськогосподарських об'єктах, сприяючи енергонезалежності сільських територій. Міністерство аграрної політики та продовольства інтегрувало технологію в стратегію «Європейський зелений курс для України», спрямовану на гармонізацію з європейськими стандартами, такими як EU Green Deal [9, с.273].

Однак, відсутність чітких норм щодо класифікації земель (чи вони вважаються енергетичними, чи сільськогосподарськими) створює значні бар'єри для впровадження. Правові проблеми включають оподаткування подвійного доходу (від енергії та врожаю), необхідність екологічних оцінок впливу на довкілля та процедури отримання дозволів, які можуть тривати до 12 місяців [16, с.8]. У 2025 році планується прийняття спеціального закону про агровольтаїку, що визначить мінімальні вимоги до врожайності (не менше 80% від традиційного рівня), стандарти монтажу панелей та механізми інтеграції з державними програмами підтримки. Ці зміни, натхненні європейським досвідом, таким як французький Act APER 2023 року, який спрощує регуляції та надає субсидії, можуть прискорити розвиток, роблячи технологію доступнішою для середніх і малих ферм [52, с.11].

Незважаючи на позитивні тенденції, впровадження агровольтаїки в Україні стикається з комплексом перешкод, що уповільнюють її поширення та вимагають системних рішень на державному рівні.

Технічні та екологічні виклики

Технічні проблеми пов'язані з високою вартістю установок: надземні системи для агровольтаїки коштують на 20-40% дорожче за традиційні сонячні ферми через необхідність посилених конструкцій, що дозволяють проїзд техніки та випас тварин. В українських кліматичних умовах, з морозними зимами та сильними вітрами, панелі потребують додаткового захисту від снігу та механічних пошкоджень, що збільшує експлуатаційні витрати на 10-15%. Затінення від панелей може зменшити врожайність світлолюбних культур, таких як соняшник чи кукурудза, на 10-20%, якщо не оптимізувати дизайн, наприклад, за допомогою біфаціальних панелей з трекінгом [1].

Екологічні ризики включають потенційну ерозію ґрунту через зміни мікроклімату та зменшення біорізноманіття, якщо панелі встановлено без урахування локальної флори та фауни. У посушливих регіонах Півдня України агровольтаїка економить воду за рахунок зменшення випаровування на 20%, але в північних районах може посилити затінення, негативно впливаючи на фотосинтез і вимагаючи адаптації культур. Крім того, питання утилізації панелей після експлуатаційного терміну (20-25 років) залишається невирішеним, з відсутністю національних програм рециклінгу, що може призвести до накопичення відходів [74].

Економічні та фінансові бар'єри

Інвестиції в агровольтаїку вимагають як мінімум 500-800 тис. грн на гектар, що є недоступним для малих і середніх ферм без зовнішньої підтримки. "Зелений" тариф стимулює розвиток, забезпечуючи окуповуваність за 7-10 років, але брак спеціалізованих кредитів та грантів гальмує масове впровадження. Фінансовий розрив для проєктів відновлюваної енергетики в аграрному секторі оцінюється в 500 млрд грн до 2025 року, з акцентом на ризики, пов'язані з війною та економічною нестабільністю. Фермери стикаються з подвійним оподаткуванням доходів від енергії та врожаю, а також з високими витратами на підключення до мережі, що робить проєкти менш привабливими для інвесторів [19, с.14].

Соціальні та юридичні аспекти

Соціальний опір зумовлений побоюваннями фермерів щодо потенційних втрат урожайності та необхідності зміни традиційних агротехнологічних практик, з недостатнім рівнем поінформованості та відсутністю системних освітніх програм. Недостатня кількість демонстраційних проектів формує скептичне ставлення до інновацій у сфері агроенергетики, особливо в сільських регіонах, де бракує кваліфікованих спеціалістів для обслуговування систем. Юридичні труднощі пов'язані з невизначеністю правового статусу земель: заборона на розміщення електрогенеруючих установок на землях сільськогосподарського призначення унеможливорює класичну агровольтаїку, за винятком промислових категорій або приватних ділянок. Збройне протистояння 2022–2025 років спричинило руйнування енергетичної та сільськогосподарської інфраструктури, пошкодивши до 30% сонячних потужностей і уповільнивши впровадження на 20-30% від запланованого [14, с.34].

Однак, перспективи агровольтаїки в Україні є обнадійливими, з потенціалом стати регіональним лідером у Східній Європі за умови реалізації комплексної стратегії, що поєднує державну підтримку, інвестиції та інновації. За прогнозами, до 2030 року потужність може сягнути 5-10 ГВт, сприяючи досягненню національних цілей з відновлюваної енергетики за умови відсутності війни у майбутньому [18, с.51].

Як відомо, Україна володіє 42 млн га сільськогосподарських земель, з яких 5-10% (близько 1,5 млн га) можуть бути адаптовані для агровольтаїки без суттєвих втрат продуктивності, генеруючи до 10-15 ГВт сонячної потужності. Південні регіони (Одеська, Миколаївська та Херсонська області) ідеальні для комбінації з овочами, садами та виноградниками, де затінення панелей зменшить вплив посух, а вертикальні або трекінгові системи оптимізують освітлення. Стратегія розвитку включає створення національної програми з субсидіями до 50% через Фонд декарбонізації, інтеграцію в "Енергетичну стратегію України до 2035 року" та співпрацю з ЄС у рамках програм Horizon Europe і Green Deal, що передбачають гранти на пілотні проекти [1]. Перспективи охоплюють

впровадження в тваринництві (пасовища з панелями для овець) та аквакультури (панелі над ставками для генерації енергії для аерації), а також інновації, як біфаціальні панелі з трекінгом, що підвищують ефективність на 15-20%. Крім того, агровольтаїка може зменшити потребу в зрошенні на 20%, збирати дощову воду, зменшувати вітрову ерозію та оптимізувати світло для культур, як показано в європейському проекті APV-RESOLA [46].

Економічно агровольтаїка забезпечить додатковий дохід фермерам від продажу електроенергії (до 20-30% від загального), створення 10-15 тис. робочих місць у будівництві, обслуговуванні та рециклінгу, а також скорочення витрат на енергію для локального споживання. Соціально технологія підвищить стійкість сільських громад до кліматичних змін, забезпечуючи децентралізовану енергію для віддалених регіонів і сприяючи енергонезалежності в умовах воєнних ризиків. До 2030 року агровольтаїка може генерувати 5-7% загальної сонячної енергії України, з потенціалом експорту технологій до сусідніх країн. Державна підтримка, як пільгові кредити через Фонд декарбонізації, робить проекти доступними, з акцентом на масове впровадження у 2025-2026 роках [72].

Для України міжнародний досвід впровадження агровольтаїчних систем є концептуально важливим, оскільки він демонструє ефективні моделі поєднання енергетичного та аграрного секторів на засадах сталого розвитку. Українські територіальні громади володіють значним земельним фондом, який одночасно є основою аграрної економіки та потенційним простором для розгортання локальних відновлюваних енергетичних систем. На відміну від країн Західної Європи, де агровольтаїка виникла як механізм подолання просторових обмежень, в Україні вона може стати інструментом відбудови та зміцнення стійкості: зменшення енергетичної залежності, мінімізації деградації ґрунтів, стимулювання зайнятості у сільських регіонах і формування нових джерел доходів для громад [55, с.79].

Попри зростання суспільного та професійного інтересу, розвиток агровольтаїки в Україні перебуває на початковій стадії. Нормативно-правове поле досі не містить чітких положень щодо подвійного використання земель, відсутні

визначення агровольтаїчних систем, критерії збереження аграрної функції ділянки та механізми погодження такої діяльності з існуючим землекористуванням. Через це впровадження проєктів відбувається переважно у формі локальних експериментів або дослідницьких ініціатив, що обмежує масштабування галузі [49, с. 18].

Європейський практичний досвід може слугувати методологічною основою для формування національного регуляторного середовища. Зокрема, німецький підхід демонструє важливість системного наукового супроводу: агровольтаїчні установки функціонують як дослідницькі платформи з обов'язковим моніторингом стану ґрунтів, мікроклімату, врожайності та екосистемних змін [45]. Французьке законодавство передбачає чітке розмежування між енергетичними та аграрними функціями землі та містить вимогу збереження щонайменше 90 % продуктивності культур під сонячними панелями. Італія натомість застосовує комбіновані стимули — грантову підтримку, довгострокові тарифи та участь аграрних кооперативів, що забезпечує економічну привабливість для малих та середніх виробників.

Адаптація цих моделей до українських умов може здійснюватися у трьох ключових напрямках:

По-перше, необхідним є нормативне закріплення термінології та юридичних критеріїв подвійного використання земель, включно з вимогами щодо збереження аграрної функції та процедурою погодження таких проєктів.

По-друге, варто створити систему моніторингу ефективності агровольтаїки, що охоплюватиме аграрні, екологічні та соціально-економічні показники.

По-третє, потрібні фінансові інструменти для стимулювання участі громад, кооперативів і малих фермерських господарств, зокрема моделі розподіленої генерації, спільного інвестування та місцевих енергетичних кооперативів.

Таким чином, стан агровольтаїки в Україні характеризується початковим етапом з пілотними проєктами, такими як Ганська СЕС, та законодавчою підтримкою через «зелений» тариф і Фонд декарбонізації, але стикається з технічними (високі витрати), економічними (брак інвестицій) та юридичними

(земельні обмеження) викликами, посиленими воєнними діями. Перспективи обнадійливі: з потенціалом 5-10 ГВт до 2030 року, технологія може посилити енергетичну незалежність, стійкість аграрного сектора та адаптацію до кліматичних змін, генеруючи додаткові доходи та робочі місця. Для реалізації потрібна комплексна стратегія: удосконалення законодавства, інвестиції в дослідження та розробки (R&D), освіта фермерів та міжнародна співпраця. Агровольтаїка стає ключовим елементом сталого розвитку України, поєднуючи виробництво їжі, енергії та охорону екології, з урахуванням глобальних тенденцій та локальних реалій.

2.3. Оцінка перспектив росту світового ринку агровольтаїки

Світовий ринок агровольтаїки демонструє стрімке зростання, обумовлене синергією між енергетичними та аграрними цілями. Розмір світового ринку агровольтаїки оцінювався в 4,59 мільярда доларів США у 2024 році та, як очікується, досягне приблизно 13,88 мільярда доларів США до 2034 року, зростаючи зі середньорічним темпом зростання 11,70% з 2025 по 2034 рік (див. рис. 2.1) [35, с.12].

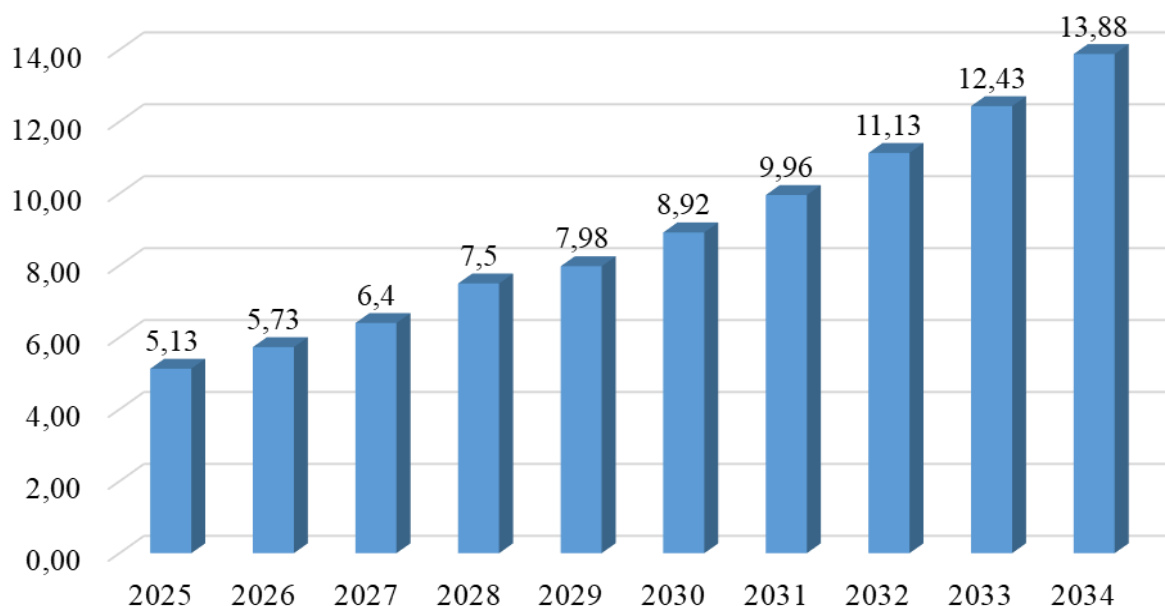


Рис. 2.1. Прогноз зростання розміру світового ринку агровольтаїки протягом 2025-2034 рр., млрд. дол. США

Ці дані свідчать про значний потенціал галузі з очевидним трендом росту та про поступове закріплення агровольтаїки як одного з ключових напрямів підвищення ефективності використання земельних ресурсів. Зростання ринку стимулюється активним впровадженням інноваційних технічних рішень, підвищенням попиту на відновлювану енергію, необхідністю адаптації аграрного виробництва до змін клімату та впровадженням політик підтримки сталого землекористування. Сукупний вплив цих чинників забезпечує формування сприятливого інституційного та інвестиційного середовища, що визначає довгострокову перспективу розвитку агровольтаїчних систем у глобальному масштабі.

Розвиток агровольтаїки не є рівномірним: ключовими регіонами росту є Північна Америка, Європа та Азіатсько-Тихоокеанський регіон (див. рис. 2.2) [56, с.10].



Рис. 2.2. Частка ринку агровольтаїки за регіонами у 2024 р.

Так, Північна Америка у 2024 році цей регіон має найбільшу частку ринку (~33%), що пояснюється розвиненою інфраструктурою, зеленою політикою та глобальними інвестиціями [1].

Ринок агровольтаїки Північної Америки зростатиме зі середньорічним темпом зростання понад 6% до 2034 року через зростання попиту на сонячну енергію та обмежену доступність земельних ресурсів. Він також стрімко розвиватиметься завдяки впровадженню інтелектуальних агровольтаїчних систем для моніторингу здоров'я врожаю та виробництва енергії.

Очікується, що Північна Америка утримуватиме провідну частку світового ринку агровольтаїки протягом наступного десятиліття. Це зумовлено зростаючим попитом на енергоресурси, активним впровадженням відновлюваної енергетики та розширенням застосування агровольтаїчних технологій як сталого інструмента підвищення енергоефективності. Ринок США, за оцінками експертів, домінуватиме завдяки поєднанню чинників, серед яких — посилена державна підтримка, економічні стимули для фермерів та високий рівень зацікавленості у модернізації аграрної інфраструктури. Важливу роль відіграє також значний рівень технологічних інновацій у сільськогосподарському секторі та наявність широкого спектра сучасної агротехніки, що створює сприятливі умови для інтеграції агровольтаїчних систем у виробничі процеси.

У Європі зростання місцевого виробництва сонячних панелей разом із позитивною державною політикою та інвестиційними витратами також сприятиме підвищенню попиту в галузі.

Європа демонструє високий потенціал через активні програми стимулювання, посилення уваги до сталого землекористування та співпрацю аграрного і енергетичного секторів [24, с.9].

Європейський регіон, за прогнозами, демонструватиме найвищі середньорічні темпи зростання на глобальному ринку агровольтаїки. Ключовим чинником є обмежена площа продуктивних сільськогосподарських земель, що стимулює пошук інтегрованих рішень для одночасного виробництва електроенергії та вирощування культур. Очікується, що розвиток агровольтаїчних

систем у Європі сприятиме підвищенню ефективності аграрного виробництва та оптимізації використання земельних ресурсів. Розширенню ринку також сприяє наявність значних площ, придатних для впровадження таких технологій, а також активна політика національних урядів, спрямована на інтеграцію відновлюваної енергетики до енергетичного балансу та підтримку інноваційних сталих рішень у сфері АПК.

В Азіатсько-Тихоокеанському регіоні активна участь урядів країн, включаючи Японію, Китай, Індію та Австралію, разом зі зростанням сонячних фотоелектричних систем в усій економіці стимулюватимуть ринковий ландшафт. За даними Всесвітнього дослідницького інституту, у 2024 році ринок сонячної енергії в Південно-Східній Азії зріс на 17% з 3 ГВт нових установок порівняно з 2023 роком, що свідчить про значний потенціал даного регіону [52, с.13].

Якщо казати про Латинську Америку, то тут агровольтаїка розвивається як відповідь на потребу поєднати високу інсоляцію з водозберігаючими практиками: пілотні проекти демонструють зниження евапотранспірації, захист від ерозії та додатковий дохід від енергії, проте стримуючими факторами є фінансова доступність, нерівномірне законодавство і питання землекористування.

На Близькому Сході та в Африці агровольтаїка має великий потенціал завдяки інтенсивному сонячному ресурсу і проблемам дефіциту води; системи підвищують стійкість культур у посушливих умовах і забезпечують місцеву енергонезалежність. Основні виклики — адаптація до пилових умов, корозії, логістика та брак інфраструктурного та фінансового забезпечення.

У 2024 році на коренеплоди, інші овочі та фрукти припадало 57%, 24% та 19% ринку відповідно. Очікується, що ринок овочів займе частку загального ринку, яка становитиме близько 90%. Посилення акценту на сталому та екологічно чистому сільському господарстві, а також на фермерах, які шукають більше джерел доходу, позитивно вплине на бізнес-середовище (див. рис. 2.3) [35, с.21].

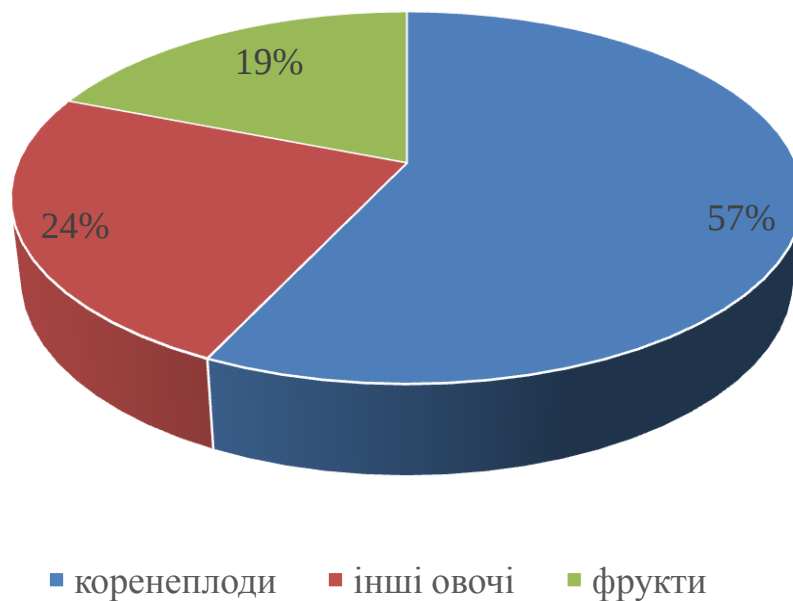


Рис. 2.3. Сегментація світового ринку агроvoltaїки за типом врожаю у 2024 р.

Коренеплоди зростатимуть зі середньорічним темпом зростання понад 6% до 2032 року завдяки здатності сонячних панелей запобігати випаровуванню води, а також дослідженням і розробкам, спрямованим на визначення овочевих культур, придатних для агроvoltaїчних систем [4, с.7].

Ключові характеристики, такі як зменшення випаровування, стабільна вологість ґрунту, зниження ризику теплового стресу для сільськогосподарських культур та покращення доходів для фермерів, стимулюватимуть зростання ринку сільськогосподарських фотоелектричних систем для фруктів.

За конфігураційними характеристиками фотомодулів світовий ринок агроvoltaїки поділяється на системи з фіксованим кутом нахилу та установки з одноосьовим трекінгом (або динамічні). Згідно з аналітичними прогнозами, саме сегмент фіксованих конструкцій демонструватиме найвищі темпи зростання упродовж прогнозованого періоду (див. рис. 2.4) [12, с.33].

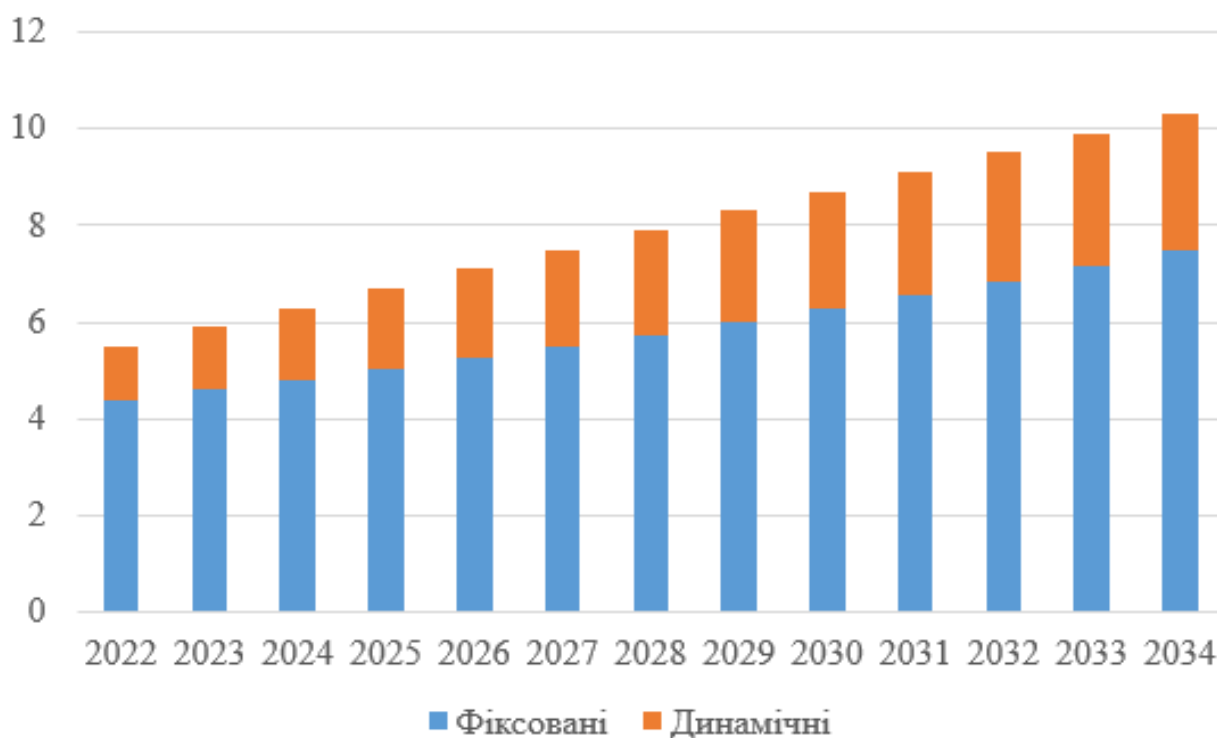


Рис. 2.4. Прогноз зростання розміру світового ринку агровольтаїки за типом конструкції систем протягом 2025-2034 рр., млрд. дол. США

Така тенденція зумовлена їхньою конструктивною простотою, економічною доцільністю та високим рівнем сумісності з технологічними процесами сільськогосподарського виробництва.

Даний ринок оцінювався в 5,5 млрд. доларів США, 5,9 млрд. доларів США та 6,3 млрд. доларів США відповідно у 2022, 2023 та 2024 роках. Сегмент фіксованої агрофотоелектрики зростатиме зі швидкістю понад 4,5% до 2034 року.

До того ж, фіксовані системи забезпечують методи інтеграції сонячних панелей, які, не порушуючи сільськогосподарську практику, підвищують оптимальну ефективність землекористування, впливаючи на динаміку галузі. Крім того, зростаючий попит на надійне та економічне виробництво енергії за допомогою сонячної енергії, а також намір спростити процес встановлення значно збільшать попит на продукцію [59, с.119].

Отже, фіксовані системи становлять істотну частку глобальних агровольтаїчних установок, забезпечуючи оптимальний баланс між генерацією електроенергії та підтриманням продуктивності агроєкосистем. Перевага цього сегмента серед фермерів і девелоперів пояснюється мінімальною складністю

монтажу, низькою потребою в технічному обслуговуванні та відсутністю механізмів повороту, що є потенційними точками відмови.

На відміну від трекінгових систем, фіксовані конструкції не вимагають застосування спеціалізованих приводів і сенсорних механізмів для корекції кута орієнтації, що істотно знижує експлуатаційні витрати та підвищує загальну надійність. Крім того, універсальність таких рішень забезпечує їхню придатність для різних типів аграрного використання — від орних земель і садівничих господарств до пасовищних систем [34, с.206].

Стаціонарність панелей мінімізує втручання в технологічні процеси вирощування, дозволяючи підтримувати стабільний розвиток культур без погіршення показників виробітку сонячної енергії. Така інтеграційна сумісність робить фіксовані системи одним із найбільш перспективних напрямів розвитку агровольтаїки в глобальному вимірі.

Найбільші світові гравці, що працюють в агровольтаїчній галузі, є [37, с.125]:

- ТОВ «Агровольтаїчне рішення»;
- Компанія «Чінт Нью Енерджі Текнолоджі Ко., Лтд.»;
- Cero Generation Limited;
- Спа-центр «Енель»;
- Інсоля;
- iSun, Inc.;
- Солярна компанія Jinko;
- Next2Sun;
- PEM TEX;
- Солярія;
- Sun'Agr;
- Корпорація SunPower.

Серед них провідними компаніями агровольтаїчного ринку є:

– Sun'Agrі пропонує динамічні агровольтаїчні рішення для оптимізації стану рослин, агрономічного моніторингу та відстеження. Компанія представила проект «Вуглецева ферма» за фінансуванням Європейської Комісії у розмірі 4,3 мільйона

доларів США. Це надасть фермерам високопродуктивні інструменти для сталого сільського господарства, що вирішать проблеми зміни клімату [34, с.206].

- REM TEC пропонує запатентовані агровольтаїчні рішення разом із проектуванням та встановленням дахових фотоелектричних електростанцій. Вона також включає термографічний та сільськогосподарський аналіз за допомогою дронів, а також різні демонстраційні проекти для підтримки зниження споживання енергії. Крім того, компанія уклала угоду з Ені на дослідження конкретних олійних культур в агровольтаїчному середовищі в Італії.

- Група VALOREM – це незалежний оператор зеленої енергетики, який пропонує різноманітні агрофотоелектричні рішення та дослідницькі програми, включаючи DEM&TER. Нещодавно компанія уклала 20-річну угоду про купівлю електроенергії з агропродовольчою компанією ALLIANCE Group для свого агрофотоелектричного проекту у Франції. Крім того, проект вироблятиме майже 12,4 ГВт·год щорічно.

- Next2Sun є лідером у сфері вертикальних двосторонніх агровольтаїчних систем та двосторонніх сонячних огорож, що забезпечують економічно ефективно та екологічно чисте виробництво електроенергії. Компанія пропонує гнучкі індивідуальні рішення зі збільшенням виходу електроенергії на 10%. Нещодавне партнерство компанії з iSun дозволило побудувати першу вертикальну агровольтаїчну електростанцію в США.

На сьогодні сформувалися три лідери в агрофотоелектричній галузі: Sun'Agri, Next2Sun та REM TEC завдяки сильним технологічним пропозиціям та великому досвіду. Стратегічні партнерства сприяють обміну знаннями, стимулюють технологічний прогрес та пропагують широке впровадження агрофотоелектричних систем. Більші корпорації, що вступають у злиття або купують агрофотоелектричні стартапи, можуть забезпечити значні фінансові ресурси для масштабування проектів. Це сприяє розширенню ринку, дозволяючи збільшити інвестиції в дослідження, розробки та розгортання сільськогосподарських фотоелектричних установок [6].

Поточну ринкову ситуацію визначають масштабні демонстраційні проекти електростанцій у різних економіках для розуміння та тестування найбільш підходящих умов, що відповідають різноманітним вимогам проектів. Ринок є

нішевим і заповненим великими розробниками або фірмами, які пропонують рішення лише для сільськогосподарської фотоелектричної галузі. Зростання конкуренції та інновацій у сонячній галузі сприятиме зниженню витрат, тим самим створюючи більше варіантів для агрофотоелектричних рішень. Фінансові стимули/допомога, розробка ефективного, недорогого сільськогосподарського фотоелектричного обладнання сприятимуть зростанню агрофотоелектричного ринку [25, с.120].

Більшість компаній, що виходять на ринок, зосереджені на підвищенні ефективності та довговічності сонячної енергії, а також на розробці технологій автоматизованого землеробства для покращення динаміки ринку. Значна увага до розвитку регуляторного середовища та забезпечення державної підтримки забезпечить конкурентну перевагу. Такі досягнення, як інтелектуальні агровольтаїчні системи, розвиток моделі сільського господарства як послуги та впровадження моделей спільного розвитку, сприятимуть розвитку бізнесу [32, с.850].

Таким чином, світовий ринок агровольтаїки демонструє стійку динаміку зростання, що зумовлена поєднанням енергетичних та аграрних цілей і підсилюється глобальними трендами переходу до відновлюваних джерел енергії. Тоді як, зростання переходу саме на чисті джерела енергії та акцент на зменшенні впливу кліматичної кризи на сільське господарство сприятимуть поширенню агровольтаїчних систем. Аналіз регіональної структури засвідчує провідні позиції Північної Америки та Європи, де розвиток агровольтаїчних технологій підтримується державною політикою, інвестиційною активністю та високим рівнем технологічної готовності. Азіатсько-Тихоокеанський регіон формує ще один центр зростання завдяки масштабному впровадженню сонячної енергетики та урядовим стимулам. Структурний аналіз ринку вказує на домінування культур з високою чутливістю до мікрокліматичних умов, а також зростання попиту на фіксовані системи як найбільш технологічно та економічно збалансовані. Сукупність технологічних інновацій, стратегічних партнерств і розширення демонстраційних проєктів формує сприятливі умови для подальшого розвитку галузі, підвищуючи її конкурентоспроможність і значущість у забезпеченні сталого землекористування.

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА АГРОНОМІЧНІ АСПЕКТИ АГРОВОДЬТАЇЧНИХ СИСТЕМ

3.1. Методи встановлення сонячних панелей для оптимізації агровольтаїчних систем

Методи розташування фотовольтаїчних панелей мають ключове значення для ефективності роботи сонячних електростанцій, оскільки правильний вибір кута нахилу, орієнтації та конструктивної схеми впливає на рівень генерації електроенергії. У практиці сонячної енергетики застосовуються як стаціонарні системи з фіксованим кутом нахилу, так і більш складні динамічні системи з відстеженням руху сонця [31, с.851].

Найпростішим рішенням є стаціонарне встановлення панелей із фіксованим кутом нахилу. У такому випадку кут орієнтується відповідно до географічної широти місцевості, що дозволяє досягати задовільних показників протягом усього року. Перевагою цієї системи є простота та низька вартість, однак вона поступається у продуктивності трекерним установкам, особливо в умовах інтенсивного сезонного коливання сонячної радіації.

Системи з одним ступенем свободи (одновісні трекери) дозволяють змінювати орієнтацію панелей упродовж дня за азимутом або за кутом нахилу. Це дає змогу підвищити виробіток електроенергії приблизно на 15–25% у порівнянні зі стаціонарними конструкціями. У випадку двовісних трекерів продуктивність може зрости на 30–40%, оскільки панелі постійно орієнтовані перпендикулярно до сонячних променів. Проте такі системи мають вищу вартість, складніші у монтажі та потребують регулярного обслуговування [36, с.303].

Порівняння основних характеристик різних способів розташування наведено у таблиці 3.1, де враховано коефіцієнт корисної дії, додаткову генерацію електроенергії та економічну доцільність.

Порівняння ефективності різних систем розташування панелей

Тип системи	Приріст генерації	Особливості
Стационарна	Базовий рівень	Низька вартість, простота
Одновісний трекер	+15–25%	Підвищена генерація, середня вартість
Двовісний трекер	+30–40%	Максимальна ефективність, висока вартість

Агровольтаїка може використовуватися по-різному залежно від діяльності, яку здійснює населення в певній місцевості (див. рис. 3.1) [43, с. 54].

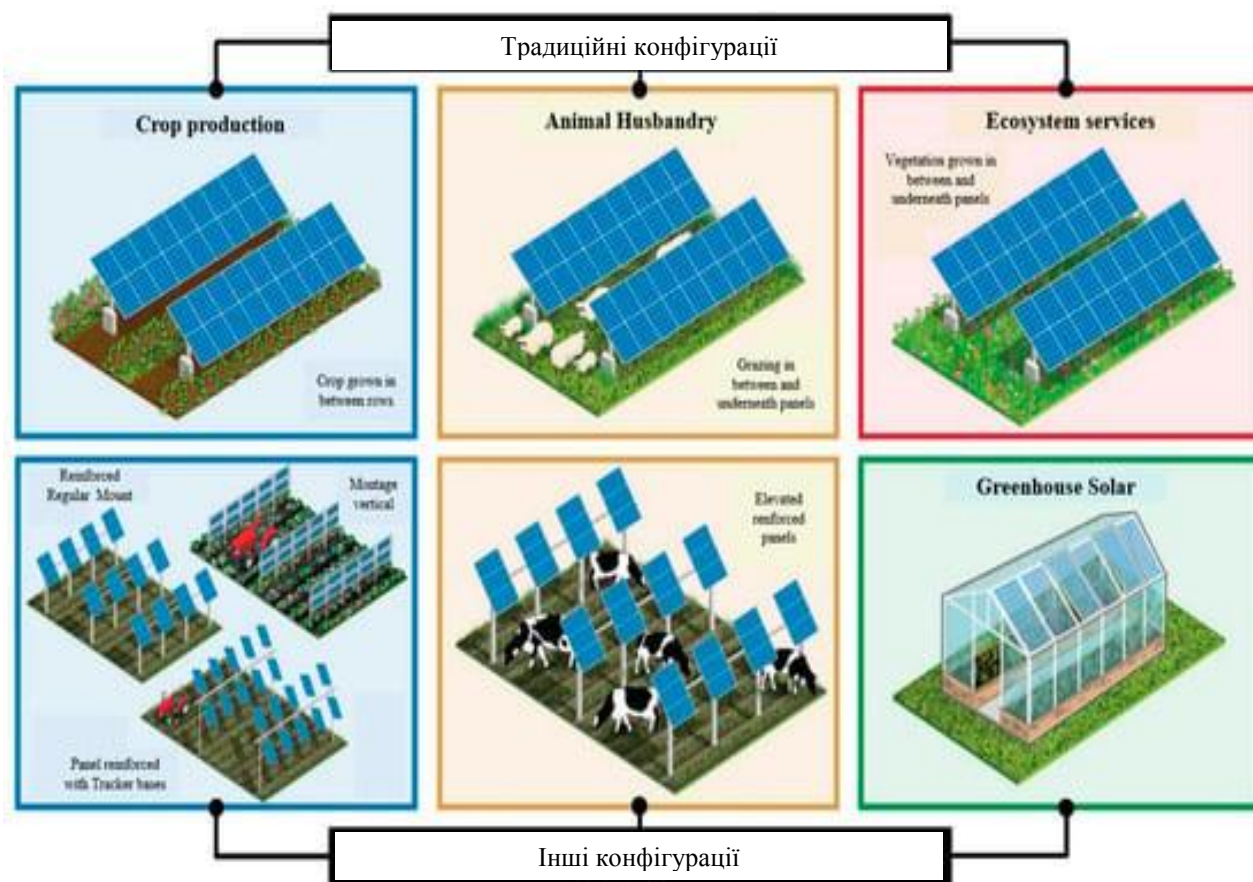


Рис 3.1. Різні агровольтаїчні системи

Агровольтаїчні системи являють собою поєднання виробництва енергії з (I) сільськогосподарським виробництвом на полі або (II) сільськогосподарським виробництвом у теплицях чи вирощуванні худоби, або (III) наданням екосистемних послуг шляхом управління рослинністю або (IV) поєднанням різних сільськогосподарських практик [74, с.21].

Конфігурації модулів в агровольтаїчних системах можна розділити на: підняті (надземні) та міжрядні. Модулі встановлюються над культурою на висоті понад 1,8 м у піднятих системах. Вирощування культур під піднятими сонячними панелями зазвичай призводить до зменшення кількості сонячної радіації, яку вони отримують, що може спричинити затінення та зменшити вплив сонячного світла. Основними культурами, що використовуються в цьому типі агровольтаїчних систем, є: виноград, дрібні фруктові дерева та овочі.

На відміну від піднятих, міжрядні фотоелектричні системи - це системи, в яких сільськогосподарське виробництво зазвичай здійснюється в просторі між рядами панелей. Відстань між двома послідовними рядами панелей може бути значною в цьому типі установки, щоб полегшити проїзд великої сільськогосподарської техніки. Найпоширенішими культурами в міжрядних сонячних системах є трави, тіньовитривалі овочі та деякі садівничі культури [59, с.118].

Різні конфігурації встановлені для порівняння їхнього впливу на рівень затінення, що створюється панелями, та їхнього впливу на врожайність сільськогосподарських культур, щоб визначити оптимальну щільність для агрофотовольтаїчної установки. Ще один спосіб підвищити ефективність фотоелектричної системи – це встановлення двосторонніх фотоелектричних панелей. На рисунку 3.2 розглянуто основні конфігурації розташування модулів в агровольтаїчних системах [71, с.15].

Для оптимізації виробництва в агровольтаїчних системах було розроблено та випробувано кілька конфігурацій і технологій. Тому установка повинна відповідати вимогам як до врожаю, так і до фотоелектричних панелей, чого можна досягти, використовуючи оптимальну відстань між панелями та висоту встановлення, що також дозволяє проїзд сільськогосподарської техніки та відповідної технології панелей.



Рис. 3.2. Конфігурації модулів в агровольтаїчних системах

Макнік та ін. визначили три типи підходів до впровадження агрофотовольтаїчних систем [36, с.301]:

1) підхід щодо виробництва енергії, який зосереджений на оптимізації виробленої сонячної енергії (таким чином мінімізуючи зміни в стандартних практиках розвитку сонячної енергетики), одночасно обробляючи рослини між та/або під панелями,

2) підхід до сільськогосподарського виробництва, який зосереджений на оптимізації виробництва біомаси (мінімізуючи зміни в існуючій діяльності з управління рослинністю), враховуючи виробництво енергії;

3) інтегрований сільськогосподарський та енергетичний підхід (враховуючи пріоритети рослинності та енергії в проектуванні системи).

Ці підходи базуються на впровадженні однієї з двох технік монтажу: відкриті агровольтаїчні системи, в яких фотоелектричні модулі встановлюються на рівні землі за допомогою опор, та закриті агровольтаїчні системи, в яких модулі встановлюються на теплицях, таким чином слугуючи покриттям [74, с.31].

Варто зазначити, що висота панелей є важливим фактором успіху різних агровольтаїчних практик. Однак, немає рекомендацій щодо ідеальної висоти

панелей для агровольтаїчної установки. Висота фотоелектричних панелей залежить від деяких факторів, включаючи географічне розташування ділянки, культуру, що вирощується, типи ґрунту та фінансових ресурсів [62, с.20].

Таким чином, висота панелей визначає культуру, що вирощується на ділянці, розташування культур у системах (між рядами панелей або під фотоелектричними панелями) та обладнання, яке можна використовувати. Крім того, сонячні панелі, встановлені в агровольтаїчних системах, можуть мати різні конфігурації залежно від клімату та ґрунту, щоб захистити конструкції від певних кліматичних небезпек, а саме від сильних вітрів та замерзання. Для цього висота металоконструкцій, що підтримують фотоелектричні панелі, має бути мінімум 1,8 м щоб забезпечити ефективне вирощування овочів під панелями. Однак, як показав іноземний досвід, оптимальною висотою для сільськогосподарських культур є 2,4 м над землею. Висота розташування модулів сприяє більш рівномірному розподілу сонячного світла під сонячними фотоелектричними панелями. Крім того, ці вищі установки також дозволяють переміщення обладнання та людей під модулями [64].

На рисунку 3.3 наведено два приклади надземної агровольтаїчної установки [37, с.142; 45].



Рис. 3.3. (a) Панелі, встановлені на висоті 4 м у Монпельє © Dupraz, (b) Панелі, встановлені на висоті 5 м у Німеччині © Fraunhofer ISE

Для традиційних сонячних установок промислового масштабу між рядами потрібна мінімальна відстань, щоб уникнути затінення один одного, але відстань

між фотоелектричними модулями одного ряду не є необхідною. Для відкритої агроелектричної системи відстань між рядами з одного боку та відстань між модулями в одному ряду з іншого повинні бути ретельно визначені відповідно до типу культури. Велика відстань між панелями збільшує пропускну здатність та рівномірність проникнення сонячного випромінювання до культури, тим самим зменшуючи вплив затінення від панелей. Відстані, що тестувалися, коливалися від 0,2 м до 6,4 м. Типове зображення відстані між модулями зображено на рисунку 3.4 [51, с.138].



Рис. 3.4. Відстань між панелями для експерименту в США.

Відстань між рядами панелей підвищує ефективність піднятих агровольтаїчних систем (рис. 3.5). Окрім підвищення рівномірності розподілу сонячної радіації на культури, така конфігурація також збільшує кількість рядів культур під панелями, полегшує переміщення великої сільськогосподарської техніки та збільшує простір, доступний для сільськогосподарських працівників. Відстань між рядами в повітряних системах, випробуваних у польових умовах, коливалася від 0,71 м до 9,5 м [45].



Рис. 3.5. Відстань між рядами панелей, що дозволяє рух сільськогосподарської техніки під фотоелектричними панелями © Fraunhofer ISE

Іншим методом оптимізації піднятих агровольтаїчних систем є використання оптимального кута нахилу та орієнтації для збільшення ефективності сонячних панелей та врожайності вирощених під ними культур (див. рис. 3.6) [66, с.15].



Рис. 3.6. (а) Одноосьовий модуль сонячного трекера та (б) двоосьовий модуль сонячного трекера.

Різні нахили та орієнтації були протестовані для різних місць розташування стаціонарних установок. Згідно з Троммсдорфом, модулі сонячного відстеження дозволяють гнучкіше керувати освітленням під панелями. Процес відстеження фотоелектричних систем включає встановлення механічної системи, яка може регулювати орієнтацію та нахил модулів у різний час доби з метою оптимізації виробництва енергії. Використовуються дві категорії систем сонячного відстеження: одноосьові трекери та двоосьові трекери. У першій конфігурації

масив фотоелектричних модулів відстежує сонце горизонтально відповідно до його кута падіння (висоти) або вертикально відповідно до його орбіти (азимуту). Друга конфігурація поєднує ці дві, виробляючи більшу кількість енергії. Ці мобільні системи оптимізують врожайність сільськогосподарських культур завдяки більшій доступності світла в критичні періоди росту. Крім того, гнучкість кута нахилу забезпечує конструктивний захист від граду або екстремального випромінювання, регулюючи їхню орієнтацію за потреби [69, с.22].

Одним з головних обмежень встановлення повітряних агровольтаїчних систем є високі інвестиційні витрати та витрати на обслуговування. Широка відстань між панелями може створити сприятливі умови для росту та розвитку сільськогосподарських культур, але призводить до зниження щільності енергії через зменшення кількості панелей, встановлених на ділянці. Крім того, відстань між рядами панелей може збільшити інвестиційні витрати в районах з високою вартістю землі та обмеженою доступністю землі. Однак ці системи стикаються з обмеженнями затінення, тому ці установки сприятливі для виноградарства. Більше того, двоосьові системи з великими масивами фотоелектричних модулів можуть створювати затінення під панелями, тоді як інші частини поверхні землі отримують максимум сонячного світла [51, с.92].

Вертикальне встановлення сонячних панелей також є методом оптимізації агровольтаїчних систем (див. рис. 3.7).



Рис. 3.7. Вертикальна агровольтаїчна установка з двосторонніми модулями

Він полягає в методі встановлення, за якого модулі орієнтовані у напрямку схід-захід, що виявилось більш ефективним для багаторічних культур, або в напрямку північ-південь, де виробництво енергії є пріоритетом. Ці системи вимагають значної відстані між послідовними рядами вертикальних опор. Крім того, 10% землі поблизу панелей не потребують оброблення та можуть бути використані як екологічні зони. У цих системах широко використовуються двосторонні панелі [60, с.47].

Вертикальні панелі мають свої переваги для сільськогосподарських культур, оскільки вони забезпечують рівномірний розподіл сонячного світла, полегшують рух сільськогосподарської техніки, очищення сонячних панелей та доступ до дощової води. Це більш економічно, оскільки зменшує витрати на обслуговування, які нижчі, ніж підняті системи [42].

У таблиці 3.2 наведено сильні та слабкі сторони різних установок.

Таблиця 3.2

Зведений огляд сильних та слабких сторін різних установок

Тип установки	Сильні сторони	Слабкість
Міжрядні системи	• Значний простір у цьому типі установки полегшує проїзд великої сільськогосподарської техніки • Низькі інвестиційні витрати	• Зниження врожайності через необроблені площі
Підняті системи з відстанню між рядами панелей	• Відстань між рядами панелей та між панелями забезпечує рівномірність сонячного випромінювання • Може створювати захист для рослин у помірних зонах • Посіви під панелями збільшують врожайність • Полегшує переміщення великої сільськогосподарської техніки • Збільшує простір, доступний для сільськогосподарських працівників	• Високі інвестиційні та експлуатаційні витрати • Можна створити тінь під панелями • Зниження щільності енергії через зменшення кількості встановлених панелей
Системи відстеження	• Більша доступність світу під час критичних періодів росту • Конструктивний захист від граду або екстремального випромінювання	• Високі інвестиційні та експлуатаційні витрати • Двоосьові системи з великими масивами фотоелектричних модулів можуть створювати нерівномірний розподіл світла на культури

Вертикальні системи кріплення	• Однорідний розподіл сонячного світла • Полегшення переміщення сільськогосподарської техніки • Очищення сонячних панелей • Доступ до дощової води для сільськогосподарських культур • Зниження вартості монтажної конструкції • Збільшення виробництва електроенергії на невеликих відстанях між монтажними конструкціями	• Зменшення сільськогосподарського виробництва за невеликих відстаней між монтажними конструкціями (2 м) • Зменшення виробництва електроенергії на великих відстанях між монтажними конструкціями (20 м)
-------------------------------	---	---

Таким чином, розглянуті методи розташування фотовольтаїчних панелей демонструють, що вибір конструктивного рішення безпосередньо впливає на ефективність енергогенерації та агровиробництва. Стаціонарні системи забезпечують мінімальні витрати, проте поступаються трекерним у продуктивності. Одновісні та двоосьові трекери дозволяють значно підвищити коефіцієнт корисної дії, але потребують більших інвестицій і технічного обслуговування [54, с.18].

Агровольтаїчні системи, які поєднують виробництво енергії та сільське господарство, мають потенціал оптимізувати використання земельних ресурсів. Їхня ефективність визначається параметрами висоти, кута нахилу, орієнтації та відстані між рядами панелей. Найкращі результати досягаються за висоти 2–4 м, достатньої відстані між рядами й використання двосторонніх або трекерних модулів.

Вертикальні та підняті конфігурації забезпечують кращу освітленість, циркуляцію повітря та зручність механізованого обробітку, проте знижують щільність енергогенерації. Отже, вибір оптимальної конструкції має ґрунтуватися на балансі між енергетичною ефективністю, агротехнічними вимогами та економічною доцільністю, що забезпечує максимальну продуктивність агровольтаїчної системи в конкретних умовах.

3.2. Фактори, що впливають на роботу фотоелектричних систем

Агровольтаїка в основному залежить від розподілу сонячного світла для виробництва фотоелектричної енергії та фотосинтезу. Таким чином, спектр сонячного випромінювання розподіляється між сонячними панелями та

культурами, що ростуть під ними [46]. Дійсно, принцип фотоелектричних систем полягає у перетворенні сонячного світла на постійний струм. Це виробництво електричної енергії є результатом поглинання фотонів фотоелектричними елементами, що піддаються впливу сонця, які, у свою чергу, вивільняють вільні електрони для виробництва електричної енергії. Крім того, сонячний елемент є основним компонентом сонячної фотоелектричної системи [69, с.11].

Сонячні елементи можна розділити на чотири покоління на основі конкретних складових елементів та їх періодів.

Перше покоління фотоелектричних елементів базується на технології кремнієвих пластин, включаючи монокристалічні та полікристалічні елементи. Комірки мають ККД від 18% до 20%, залежно від якості використовуваного кремнію. Однак, максимальна ефективність, про яку повідомлялося для полікристалічних кремнієвих елементів, може сягати 26–27%. Теоретичний максимальний ККД одноперехідних кремнієвих елементів становить близько 30% і називається межею Шоклі-Квайссера. Основна структура цих елементів зазвичай складається зі скляної передньої та задньої кришок, шарів інкапсуляції, матриці сонячного елемента та паяних з'єднань для електричного з'єднання окремих елементів [64].

Сонячні елементи другого покоління – це тонкоплівкові елементи, які мають зменшену максимальну товщину, що дорівнює кільком нанометрам або десяткам мікрометрів, порівняно з елементами першого покоління. Це зменшення товщини допомагає зменшити використання матеріалу та вартість кремнієвих сонячних елементів. Ці елементи виготовлені з двох гетероперехідних шарів, затиснутих між двома контактними шарами. Завдяки тонким плівкам телуриду кадмію було досягнуто ефективності 22,6% [60, с.52].

Елементи третього покоління складаються з сонячних елементів, сенсibilізованих барвником перовскіту та органічних сонячних елементів. Дані елементи обмежені синтезом органічних барвників та їх хімічною стабільністю. З цієї причини перовскіт використовується як альтернатива сенсibilізованому барвнику, і на дуже невеликій площі було досягнуто ефективності понад 21%.

Тандемні сонячні елементи четвертого покоління виготовлені з композитних матеріалів, що складаються з полімерів, змішаних з

наночастинками, щоб мати властивості єдиного поглинаючого шару. ТанDEMний сонячний елемент характеризується верхнім і нижнім сонячними елементами та проміжним буферним шаром. Верхні елементи поглинають сонячне випромінювання, яке потім передається до нижніх елементів. Електроди витягують утворені носії заряду, і фотострум протікає через тонкий буферний шар між двома сонячними елементами [71, с.36].

Чотири згадані покоління показано на рисунку 3.8.

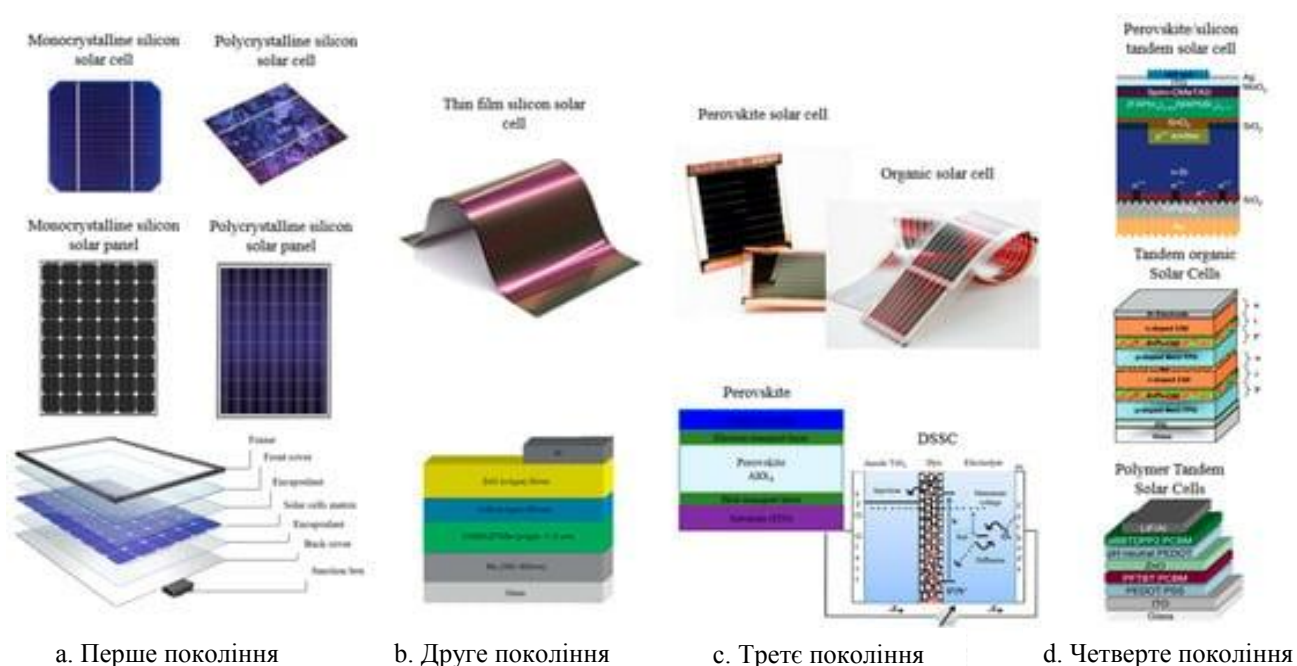


Рис. 3.8. Чотири покоління сонячних елементів та їх структури

Сонячні елементи першого покоління, а саме монокристалічні та полікристалічні елементи на основі кремнію, є найпоширенішими у комерційному світі. Крім того, 80–85% панелей на ринку виготовлені за кремнієвою технологією.

У регіонах з помірним кліматом і великою кількістю сонячного світла сонячна радіація часто є занадто інтенсивною для деяких культур, особливо влітку. У системах часто встановлюють екрани для тіні, щоб зменшити інтенсивність цієї радіації. Це напівпрозорі сонячні панелі. Дійсно, в агроелектричних системах використовуються різні непрозорі, прозорі та напівпрозорі технології, що призводить до різних змін у доступності сонячного

світла протягом доби [74, с.79]. Двосторонні панелі також широко використовуються в агровольтаїчних системах, оскільки вони використовують світло з боку землі (протилежної сторони модуля) для вироблення електроенергії. Залежно від рівня випромінювання на зворотному боці, це може збільшити виробництво електроенергії до 25%. Агровольтаїчні системи мають бути розроблені для вирощування відповідної рослинності залежно від наявної сонячної енергії, ґрунту, навколишнього клімату та інших умов. Тому оптимальні умови в агровольтаїчних системах повинні бути специфічними для місцевості, де впроваджується система [32, с.853].

Виробництво енергії фотоелектричними модулями головним чином залежить від температури елементів та сонячної радіації. Ці параметри пов'язані з такими факторами: азимут, нахил, широта, сонячне схилення, кут тіні, зенітний кут, висота підйому, наявність рослинності біля основи панелей. Продуктивність сонячної панелі визначається кількістю сонячної радіації, яку вона отримує, тоді як температура може створювати втрати потужності (висока температура) або збільшувати потужність (низька температура). Кількість сонячної радіації, яку отримує фотоелектричний масив, змінюється залежно від географічного розташування, руху сонця, кліматичних умов місцевості та орієнтації панелей. В ідеалі, падаючий сонячний потік на фотоелектричну установку повинен бути перпендикулярним до поверхні масиву, щоб максимізувати енергетичний потенціал панелей. Таким чином, оптимальну орієнтацію необхідно визначити через постійний рух сонця.

Орієнтація панелей визначається двома параметрами, а саме азимутом та нахилом. Рух сонця є функцією його висоти, яка залежить від двох параметрів, а саме широти та сонячного нахилу. Крім того, кут азимута поверхні, широта, час доби, кут нахилу, день року та кут падаючого випромінювання визначають кількість сонячного випромінювання, що отримується фотоелектричними панелями, які встановлені на заданій площі (див. рис. 3.9) [47, с.12].

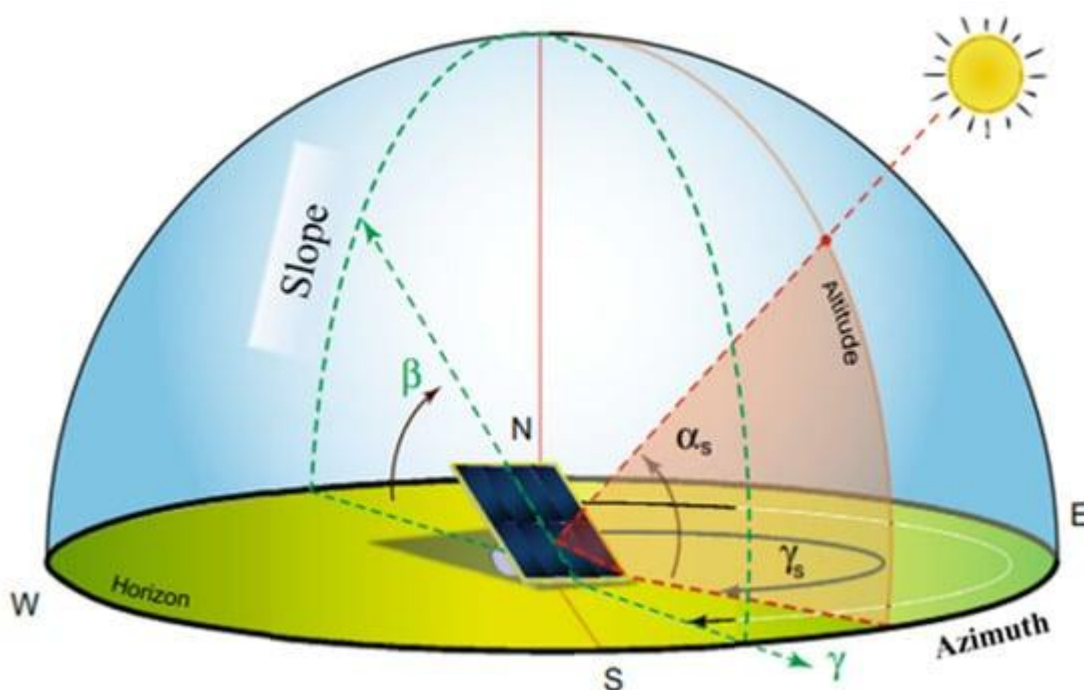


Рис. 3.9. Фактори, що впливають на продуктивність сонячних фотоелектричних панелей.

Зокрема, електрична енергія, що утворюється в результаті перетворення сонячної енергії, яка поглинається панелями, суворо пов'язана з нахилом (кут нахилу) та кутом азимуту. Кут нахилу являє собою кут, утворений горизонтальною площиною установки та фотоелектричними панелями для стаціонарної конструкції. Зміна кута нахилу одночасно призводить до зміни кількості випромінювання, що досягає поверхні фотоелектричних панелей. Однак, як правило, кут нахилу для встановлення фотоелектричної панелі майже еквівалентний широті місцевості. Сонячний азимут – це горизонтальний кут між вертикальною площиною, яка перпендикулярна до поверхні, та вертикальною площиною, в якій знаходиться центр сонячного диска, орієнтованою в напрямку північ-південь. Для цього значення азимута 90° , 0° , $+90^\circ$, 180° відповідають положенням на схід, південь, захід та північ від панелей відповідно. Таким чином, панелі орієнтовані на північ у південній півкулі та на південь у північній півкулі [49, с.3].

Інші параметри, які ймовірно можуть впливати на продуктивність фотоелектричних модулів, це (1) альбеда, яке являє собою кількість випромінювання, відбитого від поверхні землі по всьому сонячному спектру, та

(2) вертикальний кут тіні, який іноді називають вертикальним кутом профілю, що є напрямком обертання центру сонячного диска в градусах. Щодо цих параметрів, то до них додали годинний кут, який є функцією добового обертання Землі відносно її осі, та схилення, яке є кутом між вектором «центр Землі-Сонця» та екваторіальною поверхнею Землі. Також був врахований зенітний кут, який є кутом між напрямком сонця та вертикаллю місця розташування [18, с.24].

Крім того, висота над рівнем моря та зайнятість поверхні, де встановлено фотоелектричну батарею, можуть мати вплив. Було оцінено електричну енергію, що виробляється фотоелектричною панеллю у відкритій місцевості, використовуючи різні висоти та різні опори на рівні землі. Наявність рослинності біля основи панелей може бути вигідною, що призводить до збільшення ефективності сонячних панелей на 0,25-0,4%, коли панелі встановлені на висоті від 50 до 75 см від поверхні землі. Крім того, рослинність під панелями призводить до зниження температури навколишнього середовища, що може спричинити збільшення максимальної вихідної потужності фотоелектричної установки на 1,29–3,33%. Також наявність рослинності може призвести до збільшення вироблення енергії на 0,8% до 1,2% порівняно з білою або чорною підкладкою відповідно, коли панелі підняті на висоту 18 см від поверхні землі [56, с.16].

Таким чином, агровольтаїка є ефективною технологією поєднання виробництва електроенергії та вирощування сільськогосподарських культур на одній площі завдяки раціональному розподілу сонячного випромінювання між фотоелектричними панелями та рослинами. Аналіз розвитку фотоелектричних елементів показав поступовий перехід від кремнієвих до тонкоплівкових, перовскітних і тандемних систем із вищим коефіцієнтом корисної дії та гнучкішими можливостями інтеграції в аграрне середовище.

Ефективність агровольтаїчних систем визначається правильним вибором типу панелей, їх орієнтації, кута нахилу, прозорості та висоти встановлення. Оптимальне розташування забезпечує баланс між генерацією енергії та фотосинтезом, а наявність рослинності під панелями сприяє зниженню температури модулів і підвищенню продуктивності на 1–3%.

Отже, агровольтаїчні системи є перспективним напрямом розвитку відновлюваної енергетики та сталого землекористування, здатним забезпечити енергетичну ефективність, екологічну стабільність і зменшення ризиків кліматичного впливу на сільське господарство.

3.3. Вплив агровольтаїчних систем на сільськогосподарські культури

Сучасні агровольтаїчні системи – це системи, в яких вирощуються сільськогосподарські культури з урахуванням факторів, які можуть впливати на ріст культур, включаючи рівень затінення, кліматичні фактори та споживання води [71, с.27].

Доступ до обмеженої кількості сонячного світла, необхідного для процесу фотосинтезу, є основною проблемою для продуктивності сільськогосподарських культур під сонячними панелями, оскільки сонячне світло є ключовим фактором, що відіграє значну роль у рості та розвитку рослин.

Фотоелектричні панелі можуть призвести до зменшення кількості сонячної радіації, що отримується культурами, більш ніж на 40%. Рівень покриття 50% або більше також може перешкоджати росту культур. Наприклад, рівень затінення, індукований панелями, на 50% призвів до зменшення висоти культури та діаметра стебла, а також зменшення чистої швидкості фотосинтезу листя, питомої ваги листя, накопичення сухої речовини на листках і стеблах, а також кількості зерен кукурудзи. З цією метою оптимальний рівень затінення для забезпечення енергетичних потреб фотосинтезу складається з рівня щільності потоку фотосинтетичних фотонів, здатного як насичувати асиміляцію CO₂, так і сприяти стабілізації умов затінення та зменшувати фотоінгібування [63].

Тим не менш, затінення, спричинене фотоелектричним полем, може бути корисним, зменшуючи кількість води, що втрачається через випаровування, і, отже, підвищуючи ефективність використання води. З цією метою ці пристрої є сприятливими в посухостійких районах у спекотні періоди, оскільки вони зменшують потребу культур у воді завдяки зниженому випаровуванню. Агровольтаїчні системи можуть збільшити вологість ґрунту на 14,7% для

стаціонарних установок та на 11,1% для мобільних установок. Більше того, панелі в агровольтаїчних системах дозволяють ефективніше використовувати воду (за оцінками, на 328%), підтримуючи вищий рівень вологості ґрунту порівняно з вологістю ґрунту на повністю сонячній ділянці вирощування. Баррон-Гаффорд показав, що позитивний вплив агровольтаїчних систем на збереження води посилюється шляхом поливу культур з дводенною частотою поливу, що підтримує на 15% вищу вологість ґрунту порівняно з ґрунтом під повним сонцем. Однак, хоча вологість ґрунту під панелями залишалася вищою, вона зменшувалася на 10% завдяки щоденному поливу, що відповідає потребам культури у воді. Крім того, дослідження, проведені в посушливих умовах щодо впливу агровольтаїчних систем на конкретні культури, показали, що ефективність використання води під панелями оцінювалася в 157%, 65% та 12% для чилі, помідорів та салату відповідно для панелі на висоті 4 м [32, с.849]. Крім того, дослідження моделювання, показали зниження потреби салату у воді менш ніж на 20% в результаті впливу панельного затінення.

Затінення, спричинене панелями, та збільшення вологості ґрунту впливають на мікроклімат ділянки, оброблюваної під панелями. Дослідник Аде встановив, що підняття фотоелектричних панелей на 1,2-2 м призводить до значної зміни температури повітря, відносної вологості та швидкості вітру на поверхнях поблизу фотоелектричних панелей. У дослідженні, проведеному в США з вирощування помідорів, було відзначено, що температура повітря коливалася від 21,5°C до 22,3°C на ділянках, вирощених на відкритому повітрі, тоді як під панелями вона знизилася до 19,8°C (для висоти 2,2 м та кута нахилу 18°). Ряди мали найвищу середню відносну вологість – 79,38%, далі йшли ділянки, вирощені на відкритому повітрі – 74,63%, а ділянки, розташовані під панелями, мали розрахункову вологість 73,54%. Температура ґрунту під фотоелектричними панелями оцінювалася на рівні 20 °C, 24,7 °C та 25,6 °C, між рядами панелей та контролем відповідно [29, с.42]. Крім того, швидкість вітру була нижчою (0,65 м/с) між рядами панелей, тоді як на відкритому полі вона становила 0,89 м/с. Таким чином, мікроклімат під панелями по-різному змінюється залежно від клімату місцевості та топографії землі. Дослідження в тропіках показало, що температура повітря була однаковою на відкритому полі та у вищих і середніх

районах під панелями. Однак вона була вищою в районах з нижчим рельєфом під фотоелектричними панелями. Щодо відносної вологості, ці дослідження показали, що відносна вологість була вищою під фотоелектричними панелями, оцінюючись у 65%, порівняно з 63,7% між рядами фотоелектричних панелей та 53,5% на повному сонці [33, с.10].

Панелі знизили середню температуру ґрунту на 5,2°C влітку, мінімум на 3,5°C та максимум на 7,6 °C, а взимку у Великій Британії вона збільшилася на 1,7°C. Отже, температура ґрунту під панелями знизилася на 3,1 °C у посушливих зонах та на 1,1 в екваторіальних та помірних зонах. Більше того, температура ґрунту може змінюватися залежно від технології встановлення. Наприклад, температура ґрунту під стаціонарними панелями виявилася нижчою, ніж під мобільними панелями, оскільки випромінювання, що перехоплюється панелями, вище для мобільних технологій. Крім того, агровольтаїчні системи можуть призвести до зниження температури ґрунту на 4°C для стаціонарних та на 1,5°C для мобільних установок [62, с.13].

Варто зазначити, що під час сильних дощів сильний стік з фотоелектричних модулів може призвести до ерозії ґрунту та утворення ярів. Однак проблема виникала лише на ранніх стадіях розвитку пшениці, картоплі та кореневої селери, тобто коли ґрунт був або не покритий, або ледь покритий культурами.

Щільність фотоелектричних панелей має бути нижчою, ніж для звичайних наземних фотоелектричних установок, щоб підтримувати прийнятну врожайність сільськогосподарських культур. Відстань між рядами близько 3 м вважається достатньою, щоб достатня кількість світла досягала крони сільськогосподарських культур, одночасно забезпечуючи задовільний вихід енергії. Спрямування фотоелектричних панелей на південний захід або південний схід є найбільш підходящим для досягнення рівномірних умов освітлення під панелями. Це також призвело до прогнозованого зниження вироблення електроенергії на 5% порівняно зі звичайними південноорієнтованими панелями. Оптимальний кут нахилу модуля залежить від географічного розташування; у Центральній Європі він становить близько 20–25°. Слід зазначити, що невеликий кут нахилу може призвести до збільшення відкладень пилу, оскільки вони не так легко змиваються дощем. Те саме стосується снігового покриву в регіонах з регулярними

снігопадами. Дюпра також запропонував змінювати нахил панелі протягом певних періодів року, які відповідають світлочутливим стадіям розвитку культури. Наприклад, під час сходів та передцвітіння було показано, що пшениця дуже чутлива до затінення з точки зору врожайності зерна [38, с.2726].

Однією з проблем є зниження електричних характеристик через осідання пилу на поверхні панелі внаслідок сільськогосподарського ведення, наприклад, обробітку ґрунту та збору врожаю. Зокрема, в регіонах з низькою кількістю опадів або тривалими посушливими періодами (наприклад, мусонний клімат) слід враховувати періодичне очищення поверхні модуля, щоб уникнути зниження вироблення електроенергії через осідання пилу. Однак з цим можна впоратися, інтегрувавши системи зрошення та очищення фотоелектричних систем, щоб уникнути додаткового споживання води (див. рис. 3.10) [34, с.207].

Його застосування також можливе в системах автономного фотоелектричного живлення (APV). Стічні води системи очищення фотоелектричних модулів можна збирати або безпосередньо використовувати для зрошення сільськогосподарських культур, що вирощуються під ними [11].

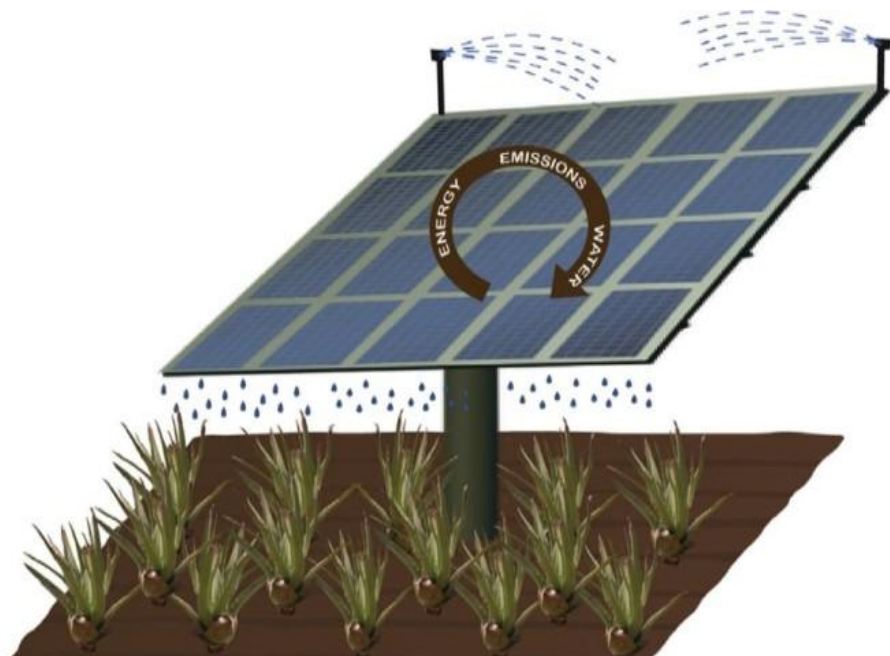


Рис. 3.10. Інтеграція очищення поверхні фотоелектричних модулів із системою зрошення

Успіх виробництва в агровольтаїчних системах значною мірою залежить від вибору культур, що вирощуються. Культури, вирощені під фотоелектричними панелями, часто зазнають різних кліматичних умов, ніж ті, що вирощуються на повному сонці, через затінення, створюване сонячними панелями. Крім того, культури різних сортів одного виду можуть по-різному реагувати на однакові умови. Для цього вплив агровольтаїчних систем на сільськогосподарські культури узагальнено у Додатку Б, враховуючи різні культури та місця розташування [34, с.210].

Ступінь зменшення сонячної радіації під навісом фотоелектричної панелі (APV) дуже залежить від сезонної висоти сонячного освітлення, положення під масивом та технічної реалізації об'єкта. Останнє включає орієнтацію, кут нахилу та розмір панелей, а також відстань між ними. Через розташування фотоелектричних модулів затінення під об'єктом не є рівномірним і змінюється протягом дня залежно від висоти сонячного освітлення. У дослідженнях з APV-системами, адаптованими для виробництва сільськогосподарських культур, наприклад, завдяки зниженій щільності модулів, прогнозувалося, що доступна для сільськогосподарських культур радіація досягне значень від 60 до 85% від радіації у відкритому полі [37, с.128].

Існує сильна кореляція між врожайністю зерна та опроміненням у таких зернових культурах, як пшениця, рис та кукурудза. Ступінь зниження врожайності залежить від інтенсивності затінення, періоду часу та стадії розвитку культури, на якій застосовується затінення.

Тіньовитривалі сорти продемонстрували низку стратегій адаптації, включаючи збільшення загальної площі листя, змінену орієнтацію листя та змінену морфологію з довгими, ширшими, тоншими, але меншою кількістю листя. У пшениці було виявлено, що максимальний індекс площі листя не змінюється від затінення, тоді як біомаса соломи деяких сортів збільшувалася. Для деяких видів рослин на помірних луках експерименти з використанням затінюючих тканин показали, що залежно від сорту, можна досягти стабільної або навіть вищої врожайності в умовах помірного затінення. Ці результати були підтверджені в перший рік наших власних експериментів з APV, де затінення приблизно на третину площі PAR призвело до збільшення вегетативної біомаси

рослин у пшениці та селери, але майже не вплинуло на загальну врожайність конюшини. У кукурудзі виявили, що врожайність стебел майже не змінюється залежно від стадії росту, на якій застосовувалося затінення [73, с.14]. Отже, слід також враховувати вплив затінення на вегетативні компоненти рослин; потенційні переваги можна отримати, вибравши відповідні види та сорти культур. Зокрема, кормові культури та листові овочі, такі як капуста та салат, можуть отримати користь від зменшення сонячного опромінення, збільшуючи площу листя та, таким чином, загальну біомасу рослин.

Окрім факторів врожайності, затінення впливає на якість зібраної продукції. Однак, найпоширенішою зміною, що впливає на вирощування рослин, буде обмежена доступність світла, що, найімовірніше, призведе до втрати врожайності більшості вирощуваних культур. Ступінь втрат значною мірою залежатиме від місцевих кліматичних умов, зокрема сонячної радіації, та технічної реалізації системи APV. Особливо в посушливих регіонах, де переважають негативні наслідки високої сонячної радіації та надмірних втрат води, додаткове затінення може бути вигідним та призвести до стабільності врожайності. Оскільки схеми затінення та мікрокліматичні умови за умов підвищеного фотоелектричного поля (APV) відрізняються між сезонами, вплив на врожайність також залежатиме від того, чи вирощуються культури навесні чи влітку. Можна припустити, що у видів, які добре адаптовані до затінення або реагують посиленням виробництвом рослинної біомаси, врожайність може бути збережена або навіть збільшена. Це може бути у випадку кормових культур, трав'янистих рослин та листових овочів, таких як капуста та салат. Для деяких видів можливо зменшити прогнозовані втрати врожайності шляхом затінення, відклавши збір врожаю та таким чином подовживши період вегетації [70, с.18].

З метою визначення впливу інтенсивності освітлення на продуктивність різних типів сільськогосподарських культур проведено моделювання залежності врожайності від рівня затінення для світлолюбних, тіньовитривалих та тіньолюбних культур (рис. 3.11) [45].

Результати моделювання свідчать, що світлолюбні культури демонструють істотне зниження врожайності навіть за незначного зменшення рівня освітленості. Тіньовитривалі культури зберігають задовільну продуктивність за умов помірного

затінення, тоді як тіньолюбні культури досягають максимальних показників урожайності при рівні затінення 30–50%, що робить їх найбільш придатними для вирощування в умовах агрофотовольтаїчних систем. Водночас надмірне затінення понад 80% має критичний вплив на більшість культур і спричиняє суттєве зниження їхньої врожайності [60, с.53].

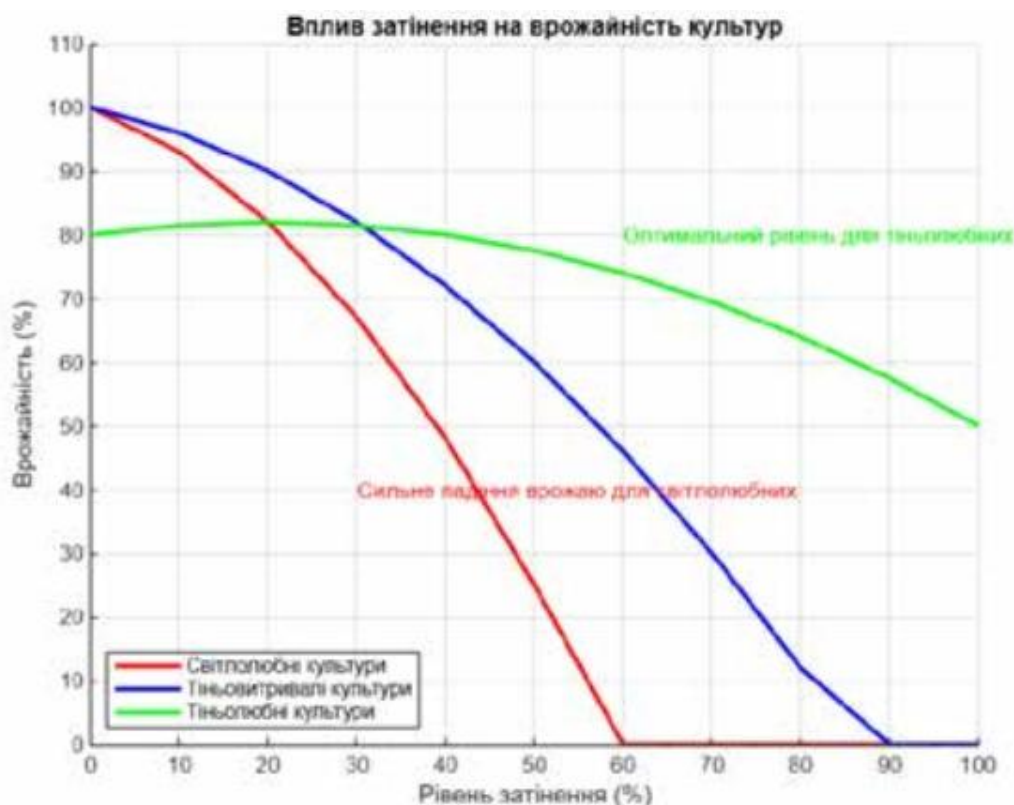


Рис. 3.11. Вплив рівня затінення на врожайність сільськогосподарських культур

Отже, раціональне проектування параметрів агровольтаїчної системи, зокрема визначення оптимальних відстаней між фотомодулями та підбір культур відповідно до їхньої толерантності до затінення, є ключовими чинниками підвищення ефективності використання земельних ресурсів. До того ж, APV може призвести до стабілізації врожайності, пом'якшуючи втрати врожайності в посушливі роки. Отримані результати мають практичне значення для оптимізації конструктивних і технологічних параметрів агрофотовольтаїчних установок, забезпечення сталого балансу між виробництвом електроенергії та аграрною продуктивністю.

РОЗДІЛ 4

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ВПЛИВУ АГРОВОЛЬТАЇЧНИХ СИСТЕМ НА ВРОЖАЙНІСТЬ ТОМАТІВ, ЕЛЕМЕНТИ БІОРІЗНОМАНІТТЯ ТА СТАН ГРУНТІВ В УМОВАХ ПІВДНЯ УКРАЇНИ

4.1. Обґрунтування вибору об'єкта дослідження

Обґрунтовуючи та актуалізуючи вибір експериментальної ділянки для моделювання впливу агровольтаїки на врожайність культур, зазначимо, що з кожним роком змінюється клімат: Літо стає жаркішим, дощі – рідше, а дефіцит води відчувається все гостріше. У таких умовах не кожен овоч здатний вижити, не кажучи вже про повноцінне плодоношення. Фермерам, особливо у південних та посушливих регіонах України, доводиться адаптувати методи вирощування, вибирати відповідні сорти та культури.

На думку Асоціації фермерів, на українському півдні варто частково займатися овочами, які не потребують великої кількості води та припинити вирощувати кормові культури. З овочів Асоціація рекомендує вирощувати баштанні, томати і все, що може рости в умовах часткового затінення.

Враховуючи той факт, що сонячні панелі, в свою чергу, створюють мікроклімат, сприятливий для вирощування певних видів культур, часткова тінь від модулів зменшує випаровування води з ґрунту на 20-30%, що критично важливо в регіонах з нестачею вологи та підвищує ефективність зрошення. Затінення захищає рослини від перегріву в спекотні дні, що особливо актуально в умовах зміни клімату та підвищення середньорічних температур. Дослідження показують, що для деяких культур, таких як салат, шпинат, ягоди, овочі, зокрема томатів обраних сортів, врожайність під сонячними панелями може навіть перевищувати показники відкритого ґрунту. Панелі також захищають рослини від граду, сильних дощів та інших несприятливих погодних умов, зменшуючи ризики втрати врожаю.

Зниження випаровування води завдяки тіні від панелей зменшує потребу в зрошенні на 15-25%, що критично важливо в умовах водного дефіциту. Система сприяє збереженню біорізноманіття, оскільки під панелями створюється

середовище, сприятливе для різних видів рослин і комах. Використання відновлюваної енергії зменшує викиди парникових газів та сприяє декарбонізації сільського господарства. Агровольтаїка також знижує навантаження на національну енергосистему, що є особливо актуально в нинішніх умовах, забезпечуючи децентралізоване виробництво електроенергії безпосередньо в місцях споживання.

Асоціація фермерів виявила, що ідеальними кандидатами для цілей агровольтаїки є культури з меншою щільністю кореневої системи та високим чистим рівнем фотосинтезу.

Хоча томати часто вважають вологолюбними, багато сортів демонструють відмінну стійкість до посухи, особливо дрібноплідні томати з щільними плодами. У них потужне коріння, здатне працювати в сухій землі.

Для цілей дослідження, було обрано Білгород-Дністровський район Одеської області.

Південь України є напівпосушливим регіоном, хоча певні його частини, особливо прибережні райони, можна вважати більш посушливими. Ця зона характеризується переважно степовим кліматом, де є помірна кількість опадів, але недостатньою для усунення дефіциту вологи, особливо влітку.

Потрібно зазначити, що посушливі та напівпосушливі регіони відіграють життєво важливу роль у світовому виробництві продуктів харчування, проте є одними з найбільш вразливих ландшафтів до зміни клімату.

У цих регіонах і без того крихкий баланс між доступністю води та температурою повітря означає, що навіть невеликі кліматичні зміни можуть перевищувати межу толерантності для багатьох видів рослин і тварин. Більшість сільськогосподарських культур характеризуються наявністю специфічного температурного діапазону – фізіологічного оптимуму, вихід за межі якого призводить до уповільнення їхнього розвитку або до повної втрати здатності формувати повноцінний урожай. Підвищення температури, пов'язане зі зміною клімату, може вивести умови за межі цього діапазону, що призведе до теплового стресу, зниження фотосинтетичної здатності, зниження росту та пов'язаної з ним врожайності.

З огляду на ці прогнози, довгострокова життєздатність поточних стратегій адаптації ставиться під сумнів. Хоча забезпечення достатнього водопостачання досі мало вирішальне значення для того, щоб допомогти сільськогосподарським культурам витримувати високі температури, прогнозоване зниження доступності води на півдні України означає, що цього підходу буде недостатньо для захисту виробництва. Тому очікується, що за відсутності відповідних адаптаційних заходів подальше підвищення температури та зменшення доступності водних ресурсів з високою ймовірністю формуватимуть умови, несприятливі для дедалі ширшого спектра сільськогосподарських культур.

Серйозність прогнозованого впливу підкреслює нагальну потребу в трансформаційних адаптивних стратегіях, які можуть підвищити стійкість сільськогосподарських систем, що, в свою чергу, актуалізує та обґрунтовує перспективність підходів інтеграції сільськогосподарських практик із сонячними панелями. Розміщення сонячних панелей над полями з сільськогосподарськими культурами створює унікальний мікроклімат, який характеризується зменшенням прямої сонячної радіації, що може призвести до зниження денної температури повітря та ґрунту.

Практично та науково доведено, що таке змінене середовище покращує доступність води шляхом зменшення дефіциту тиску пари та евапотранспірації, що призводить до вищої вологості ґрунту порівняно з землеробством на відкритому полі.

Експериментальне поле для цілей дослідження, знаходиться біля міста Татарбунари в Білгород-Дністровському районі Одеської області над лиманом Сасик у південній Бессарабії (рис. 4.1.).

Дане експериментальне дослідження впровадження моделі агровольтаїки може бути інтегроване у інноваційну пілотну модель післявоєнного відновлення України, яку планується реалізувати у Татарбунарах у межах програми Horizon Еуропа для реалізації проекту AgriHome Recovery утвореного міжнародним консорціумом.

До складу консорціуму увійшли: IAK Agrar Consulting GmbH (Німеччина), як лідер консорціуму, Київський Хай-Тек Кластер, Асоціація агровольтаїки

України, Одеський державний аграрний університет, Natural Resources Institute Finland (LUKE), Swedish University of Agricultural Sciences (SLU).

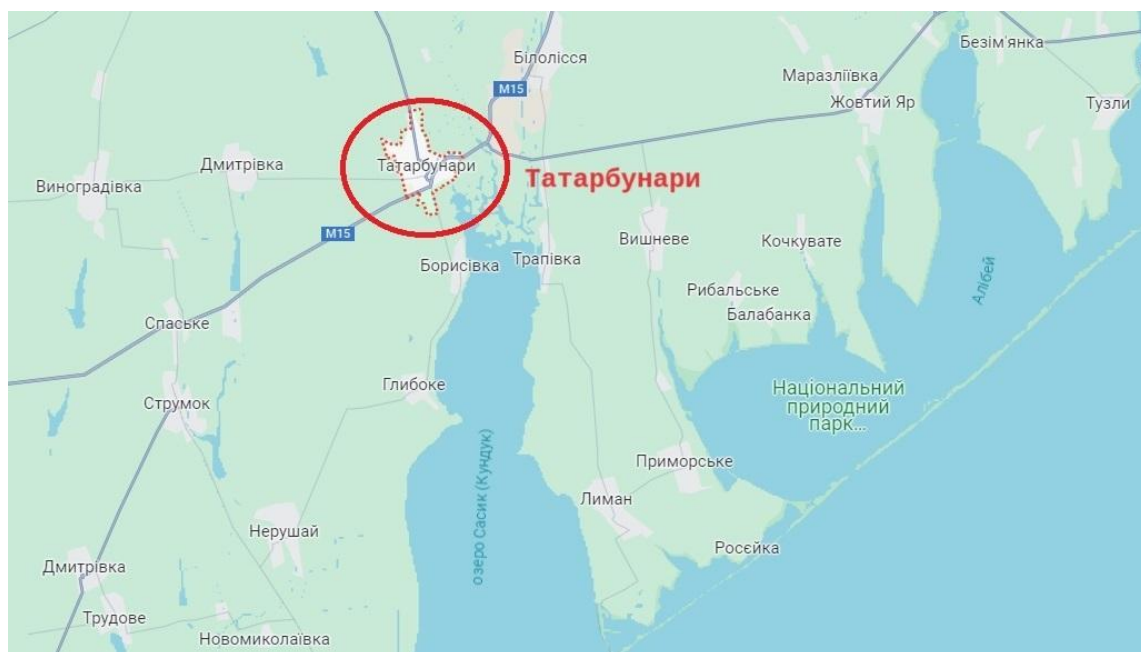


Рис. 4.1. Татарбунарська територіальна громада Одеської області

У підготовці проекту також було задіяно багатьох інших партнерів, які розуміють важливість післявоєнного відновлення, серед них: ГО KICAP, SolarSK, ГрінХаус2024, Fraunhofer ISE, Одеська державна академія будівництва та архітектури.

Проект передбачає тестування інноваційної моделі післявоєнного відновлення України. Мета – створити комфортне для проживання та праці поселення, де сім'ї матимуть спільну чисту електроенергію з відновлюваних джерел, чисту воду, екологічне виробництво продуктів харчування, дієвої кооперації та активного громадського життя. Модель розроблена як прототип, який згодом можна буде масштабувати та адаптувати до інших регіонів України та за її межами.

У рамках проекту планується побудувати пілотне поселення у селі Струмок Татарбунарської територіальної громади як «живу лабораторію». Сім'ї ВПО отримають доступ до сучасних будинків, побудованих з екологічно чистих матеріалів, з електроживленням на сонячній енергії та опаленням від спалювання

вироснути поряд біоенергетичних культур, з теплицями для виробництва городуни та системами повторного використання води.

Особливу роль у проекті може відіграти й агровольтаїка як провідна технологія, яка поєднує виробництво відновлювальної енергії та продуктів сільського господарства.

Мешканці Татарбунарської громади та інших зацікавлених громад пройдуть навчання та отримають нові можливості працевлаштування, а соціальна підтримка та участь у прийнятті рішень громадою допоможуть зміцнити довіру та добробут. Проект також створить цифровий інструмент для моделювання та планування майбутніх поселень, а також підготує посібники та навчальні матеріали для полегшення масштабування.

Європейсько-Український підхід виходить за рамки простої відбудови та демонструє, як циркулярні та природоорієнтовані рішення можуть зробити громади більш стійкими, кліматично безпечними, соціально згуртованими та зручними для тих хто втратив житло.

Проект безпосередньо підтримує принцип ЄС «відбудувати краще та зеленіше» та сприяє Європейській Зеленій угоді, Стратегії ЄС з біоекономіки та Стратегії адаптації до зміни клімату. Він на практиці продемонструє, як відновлення може зменшити викиди вуглецю, як агровольтаїка може відновити екосистеми, створити робочі місця та забезпечити сім'ям ВПО стаке майбутнє.

4.2. Матеріали та методи дослідження

Моделювання і експериментальні розрахунки планується провести на полі площею 24 × 24 метри, де було змонтовано 135 сонячних панелей двох типів, розташованих на овочевому полі Татарбунарської громади (Татарбунари, Одеська область, Україна).

Клімат Татарбунарів – помірно континентальний, зі спекотним сухим літом та м'якою, малосніжною зимою. Середня температура липня становить близько +21...+24° (абсолютний максимум до +41 °C). Річна кількість опадів – близько 420-450мм (з максимумом у літні місяці у вигляді інтенсивних злив), а відносна вологість – близько 69,7% (влітку знижується до 60–65 %).

Фотоелектричні панелі (ФЕП) заплановано розташувати смугами, орієнтованими зі сходу на захід, шириною 3 м та нахиленими на південь, з кутом нахилу 18° . ФЕП будуть розташовані на висоті 0,8 м над землею в найнижчій точці та на висоті 2,2 м над землею в найвищій точці. Відстань між панелями становитиме 3 м, як показано на рис. 4.2.

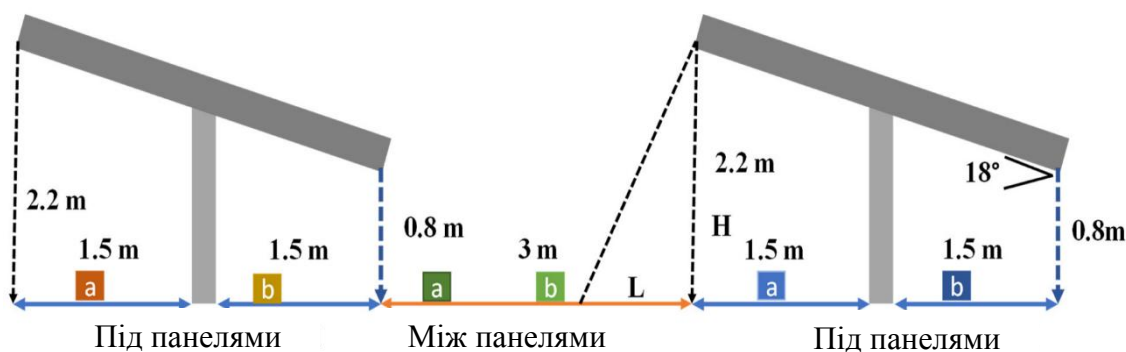


Рис. 4.2. Схематичне зображення зон тіні (H – висота об’єкта, а L – довжина тіні).

Кут нахилу 18° для агровольтаїчної установки в Одеській області (широта $\approx 46\text{--}47^\circ$) є свідомим відхиленням від класичного оптимуму ($\beta \approx \text{широта} - 10^\circ$), яке повністю виправдане специфікою дуального використання землі.

Низький кут зміщує пік генерації саме на літні місяці (травень-серпень), коли в регіоні найвища інсоляція, максимальна потреба культур у затіненні та охолодженні ґрунту, а також найвища частка самоспоживання енергії. За модельними оцінками (PVsyst/TMY Одеса), кут 18° порівняно з $35\text{--}40^\circ$ дає на 8-14% більшу літню віддачу при втраті лише 4-7% річної генерації.

Також, горизонтальніше розміщення сонячних панелей зменшує довжину та різкість тіней у критичні ранково-вечірні години, забезпечуючи рівномірніше надходження ФАР до рослин (особливо важливо для томатів, перцю, баклажанів та зеленних культур). Вертикальна проєкція модуля при 18° майже вдвічі менша, ніж при 40° , що знижує локальне перезатінення під панелями та зменшує ризик теплового стресу ґрунту.

До того ж, конструктивно-економічні переваги очевидні: вітрове навантаження зменшується на 35–45%, що дозволяє легші та дешевші опори,

снігове навантаження в регіоні мінімальне, а доступ сільгосптехніки між рядами суттєво полегшується.

Система сонячних панелей матиме загальну потужність 46,2 кВт. До встановлення пропонуються модулі фотоелектричні Viessmann Vitovolt у двох варіантах – звичайні та напівпрозорі панелі (див. рис. 4.3). Їх характеристики та порівняльні дані описані у Додатках В та Г.

Враховуючи особливості затінення панелями AVS (agrovoltaic system), поле було розділено на п'ять ділянок. Перша ділянка, покрита панелями з традиційними/звичайними сонячними панелями (Con), складалася з двох варіантів, тобто Con50% та Con80%. Друга ділянка, покрита панелями з напівпрозорими сонячними панелями (ST), також складалася з двох варіантів, тобто ST50% та ST80%. Позначення «50%» як для Con, так і для ST означає, що ця конкретна ділянка затінена протягом 50% денного часу, тоді як «80%» як для Con, так і для ST означає, що відповідна ділянка затінена протягом 80% денного часу. Решта поля, яка не була покрита, розглядалася як еталонний варіант (Open).

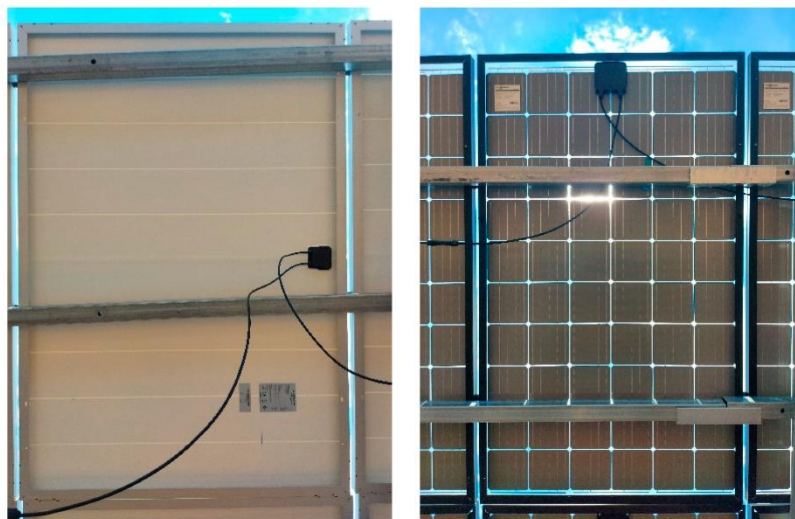


Рис. 4.3. Види розміщуваних панелей Viessmann Vitovolt

Експериментальні дані будуть збиратися із локалізованих зон (описаних далі), включаючи ділянки під сонячними панелями та контрольну зону за межами агроелектричної системи (див. Додаток Д). Ґрунт ділянки – це звичайний малогумусний чорнозем з рН верхнього шару ґрунту 6,0 – 6,5 та вмістом

органічної речовини 6,06%. Даний рН вказує на нейтральну або слабокислу реакцію ґрунту, яка вважається найсприятливішою для росту рослин.

Томат був обраний як культура, чутлива до кількості сонячного світла, та яка однією з найважливіших товарних культур у світі, особливо у Середземноморському регіоні.

Обраний сорт томатів – Пьетра Росса F1, Clause, Франція. Характеристику сорту наведено у Додатку Е.

Для оцінки впливу двох різних сонячних панелей на ріст та продуктивність врожаю, сорт томата Пьетра Росса F1 потрібно вирощувати протягом чотирьох місяців з початку травня до кінця серпня 2026 року. Томати мають бути висаджені в першій декаді травня в 21 ряд; кожен ряд довжиною 24 м. Відстань між кожним рядом повинна становити 1 м, а відстань між рослинами томатів у кожному ряду – 0,7 м. Рослини планується розміщувати на піднятих грядках приблизно на 0,3 м над рівною поверхнею землі. Всі ряди бажано затягнути чорною агротканиною (спанбондом) (рис.4.3.)



Рис. 4.3. (а – с) Рослини під панеллю та (d – f) між рядами на різних стадіях росту рослин.

Крім того, важливу роль тут відіграє добриво для томатів. Так, добриво NPK 16/16/16, збалансоване мінеральне добриво, яке містить три основні

елементи живлення: азот (N), фосфор (P) та калій (K) в рівних пропорціях, його бажано вносити у кількості 2,15 кг на кожен ряд.

4.3. Управління вологістю, біометричними вимірюваннями та врожайністю

У цьому дослідженні пропонується проводити вимірювання вмісту води в ґрунті за допомогою вологоміру ґрунту TDR 150 (рефлектометрія в часовій області) для складання графіків поливу, щоб врахувати зміни у виснаженні води в кореневій зоні. Цей метод базується на вимірюванні швидкості поширення високочастотного сигналу в ґрунті.

Для всіх вимірювань з метою визначення об'ємного вмісту води в ґрунті використовувався TDR 150 (Додаток Ж). Його було обрано завдяки точності, компактній конструкції та відносно низькій вартості. Цей TDR пропонує швидкий час вимірювання вмісту води – 2 с (вихідний сигнал генератора імпульсів: 250 мВ при 50 Ом; вихідний імпеданс: $50 \text{ Ом} \pm 1\%$), що дозволяє щодня проводити значну кількість вимірювань. Крім того, він сприяє неруйнівним, довготривалим вимірюванням ґрунту *in situ* (на місці у природному середовищі). TDR 150 був поєднаний із зондом TDR, що складався з лінії передачі (RG58, характеристичний імпеданс 50 Ом, довжиною 200 см, з імпедансом роз'єму 0,2 Ом) та трьох стрижнів довжиною 15 см, внутрішньою відстанню 3 см та діаметром 0,3 см.

Зонди TDR повинні бути розміщені на глибині 15, 25 та 50 см, близько до коренів, у шести місцях (по два місця для кожної експериментальної ділянки). Додатково 15 зондів TDR глибиною лише 15 см мають бути розподілені протягом усіх обробок, щоб врахувати вплив системи затінення на випаровування води з поверхні ґрунту. Стан ґрунтових вод має оцінюватися по всій кореневій зоні щоранку та щодня вдень для точнішого планування поливу. Вміст води в ґрунті потрібно підтримувати в межах польової ємності (FC) та заздалегідь визначеного порогу виснаження води під час цього експерименту. Враховуючи тип ґрунту, значення FC та точки постійного в'янення (PWP) вважається 33% та 13% відповідно. Допустиме виснаження ґрунтових вод оцінюється як 30% від загальної доступної води (TAW) на ранніх стадіях (до цвітіння) та як 40% на

пізніх стадіях. Тому полив повинен бути запланований до того, як вміст води в ґрунті досягне рівня легкодоступної води (RAW), а поповнення повинно проводитися до рівня FC (польової ємності). При крапельному зрошенні обсяг ґрунту в кореневій зоні зволожується лише частково і не повинен перевищувати 40%.

Треба також зазначити, що вимірювання миттєвої транспірації та чистої асиміляції рослинного покриву в природних умовах становить великий інтерес, особливо при вивченні поведінки рослинного покриву у відповідь на різні умови навколишнього середовища. Найпоширеніший метод вимірювання фотосинтезу рослин базується на газообміні, який є неруйнівним методом, що забезпечує прямі та миттєві вимірювання.

Для визначення чистої швидкості фотосинтезу та його компонентів, продихової провідності, температури листя та швидкості транспірації рекомендується використовувати портативну систему фотосинтезу LI-COR LI-6400 (LI-COR Inc., Лінкольн, Небраска, США).

LI-6400 – це відкрита система, де вимірювання фотосинтезу та транспірації базуються на різниці між вмістом вуглекислого газу (CO_2) та води в потоці повітря, що протікає через кювету для листя. Вона використовує інфрачервоний газовий аналіз (IRGA) для вимірювання швидкості поглинання CO_2 та обміну водяної пари в листі. LI-6400XT складається з двох основних пристроїв: консолі аналізатора, на якій проводиться газовий аналіз та зберігаються дані в реєстраторі даних, та сенсорної головки, яка має камеру для листя, що контролює всі фактори мікроклімату (температуру, відносну вологість, парціальний тиск CO_2 та опромінення) (Додаток 3).

Фізіологічні параметри повинні бути виміряні за допомогою приладу LI-6400 на відібраних листках, що перебувають на сонці та не мають ознак хвороб чи пожовтіння, у такі дати після висаджування (1 червня): 8 червня, 22 червня, 30 червня, 7 липня, 13 липня та 28 липня. Вимірювання має проводитися приблизно о 12:00, щоб зафіксувати оптимальні умови для реакції рослин на атмосферу, на шести рослинах, відібраних випадковим чином для кожного методу зростання.

Миттєве вимірювання LI-COR має використовуватися для представлення контексту вимірювань протягом певного періоду доби, а саме опівдні за ясного

неба. Система газообміну LI-COR оцінює вплив погодних умов на миттєву продуктивність рослини. По суті, вимірювання фенологічних параметрів опівдні обрано тому, що система забезпечує вимірювання потоку CO_2 , яке тісно пов'язане з умовами навколишнього середовища. Це забезпечує мінімальне втручання в навколишнє середовище, і для цієї мети зазвичай вибираються стабільні погодні умови, зокрема безхмарне небо.

Більше того, наприкінці вегетаційного циклу (кінець серпня) шість рослин томатів з кожного варіанту обробки були випадковим чином зібрані та розділені на пагони (стебло та листя) та коріння. Була зафіксована кількість листя для кожної рослини. Також діаметр стебла вимірювали штангенциркулем, довжину стебла та коренів гнучкою лінійкою з точністю до 0,5 мм. Вагу сухого пагона та кореня кожної рослини вимірювали, поміщаючи їх у сушильну шафу при температурі 70°C на 48 годин.

Врожай помідорів планується збирати протягом чотирьох збиральних кампаній (враховуючи дату висаджування не пізніше 1 червня), а саме: 26 липня, 1 серпня, 9 серпня та 23 серпня. Перед кожним збором врожаю потрібно випадковим чином вибирати п'ять рослин на кожній ділянці, крім двох ділянок, в яких рослини вирощували без будь-якого укриття, але зрошувалися такою ж кількістю води, як і рослини, вирощені за стандартним режимом (відкритий стандартний) та консервативним (відкритий консервативний). Під час кожного збору врожаю потрібно підраховувати загальну кількість плодів, а також кількість і вагу стиглих плодів на рослину. Крім того, діаметр плодів має вимірюватися за допомогою штангенциркуля. Плоди мають збиратися в повній зрілості, що має відповідати стадії червоного кольору (більше 80% червоного кольору), і сортуватися, видаляючи зелені, потріскані або з симптомами гнилі, сонячних опіків або пошкоджені плодовою жучкою томатів.

Відразу після збору врожаю з кожного експериментального сектору випадковим чином має бути відібрано п'ятнадцять однорідних плодів (п'ять помідорів на повторність) для аналізу якості. Колір визначається, використовуючи колориметр (Minolta CR 400 Chroma Meter, Осака, Японія). Значення кольору визначається за допомогою двох вимірювань, проведених по обидва боки екваторіальної зони для кожного плоду (Додаток К).

Твердість плодів планується визначати за допомогою цифрового пенетрометра (TR Scientific Instruments, Форлі, Італія), оснащеного 8-міліметровим поршневым наконечником, на екваторі плоду (для кожного плоду проводили два вимірювання з обох боків). Результати виражаються в ньютонах.

Усі хімічні аналізи планується проводити для кожного експериментального сектору у трьох повторях із соків при температурі 25 °C. Соки необхідно отримувати з п'яти зразків вагою приблизно 200 г на повторність шляхом гомогенізації за допомогою побутового гомогенізатора фруктів.

Нарешті, для визначення вмісту води (WC) та сухої речовини (DM), п'ять помідорів на кожну обробку, мають бути нарізаних скибочками, які сушать у вентильованій печі при температурі 55°C до досягнення постійної ваги (близько 48 годин).

4.4. Обговорення та інтерпретація результатів симуляцій

4.4.1. Погодні умови та фізіологічні параметри

Для цілей моделювання, дані про погоду були взяті з онлайн метеосервісів з травня по серпень 2025 року включно. Цей конкретний рік характеризувався надзвичайно спекотним літом. Протягом чотиримісячного досліджуваного періоду накопичено близько 85 мм опадів, а температура повітря коливалася від 15°C до 25°C на початкових етапах. Однак температура досягла піку в липні, досягаючи 43°C, що збігалось зі значним підвищенням швидкості випаровування, досягаючи 10 мм на день (див.рис. 4.4.a).

Для моделювання та симуляції показників дослідження було обрано програмну платформу APSIM (система моделювання сільськогосподарських виробничих систем). APSIM визнана на міжнародному рівні як високосучасна платформа для моделювання та симуляції сільськогосподарських систем.

APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) v2023 – це сучасна модульна біофізична модель, призначена для комп'ютерного моделювання функціонування агроєкосистем. Вона поєднує підмоделі росту рослин, ґрунтових

процесів, динаміки води та поживних елементів, що дозволяє оцінювати продуктивність культур, зміни мікроклімату й ґрунтових умов у різних сценаріях землекористування. Версія 2023 року відзначається підвищеною точністю розрахунків, розширеним набором екологічних параметрів та можливістю інтеграції з зовнішніми кліматичними і фотоелектричними моделями, що робить її ефективним інструментом для дослідження впливу агровольтаїчних (див. Додаток Л) [28].

.Отже, завдяки занесенню у симуляцію зібраних метеоданих та всіх первинних умов дослідження, описаних у попередніх пунктах магістерської роботи, було визначено наступні описані нижче результати експерименту.

Розраховано, що підвищена температура повітря безпосередньо вплинула на середньодобову температуру ґрунту, як показано на рис. 4.4.b, який показує значну різницю між температурою ґрунту у відкритому полі та під AVS (agrovoltaic system). Під автоматичними системами охолодження з 50% затіненням температура ґрунту була в середньому приблизно на 1,3 °C нижчою, ніж у відкритому полі. Крім того, коли рівень затінення збільшився до 80%, ґрунт залишався ще прохолоднішим, ніж у відкритому полі, зі зниженням на 2,3 °C.

Варто зазначити, що ступінь затінення суттєво впливав на температуру ґрунту, тоді як між ST (напівпрозорі панелі) та Con (звичайні панелі) не було виявлено суттєвих відмінностей. Ці результати підтверджують припущення, що ґрунт під AVS нагрівається повільніше, ніж у відкритих умовах, що підтверджує попередні результати досліджень, описаних у теоретичному розділі магістерської роботи.

Змодельовані дані вимірювань за допомогою приладу LI-COR на рівні листя дали уявлення про вхідну сонячну радіацію та фотосинтетично активну радіацію (ФАР). Останнє стосується тієї частини електромагнітного випромінювання (зазвичай вимірюється в спектральному діапазоні від 400 до 700 нанометрів), яку рослини можуть використовувати як джерело енергії для фотосинтезу.

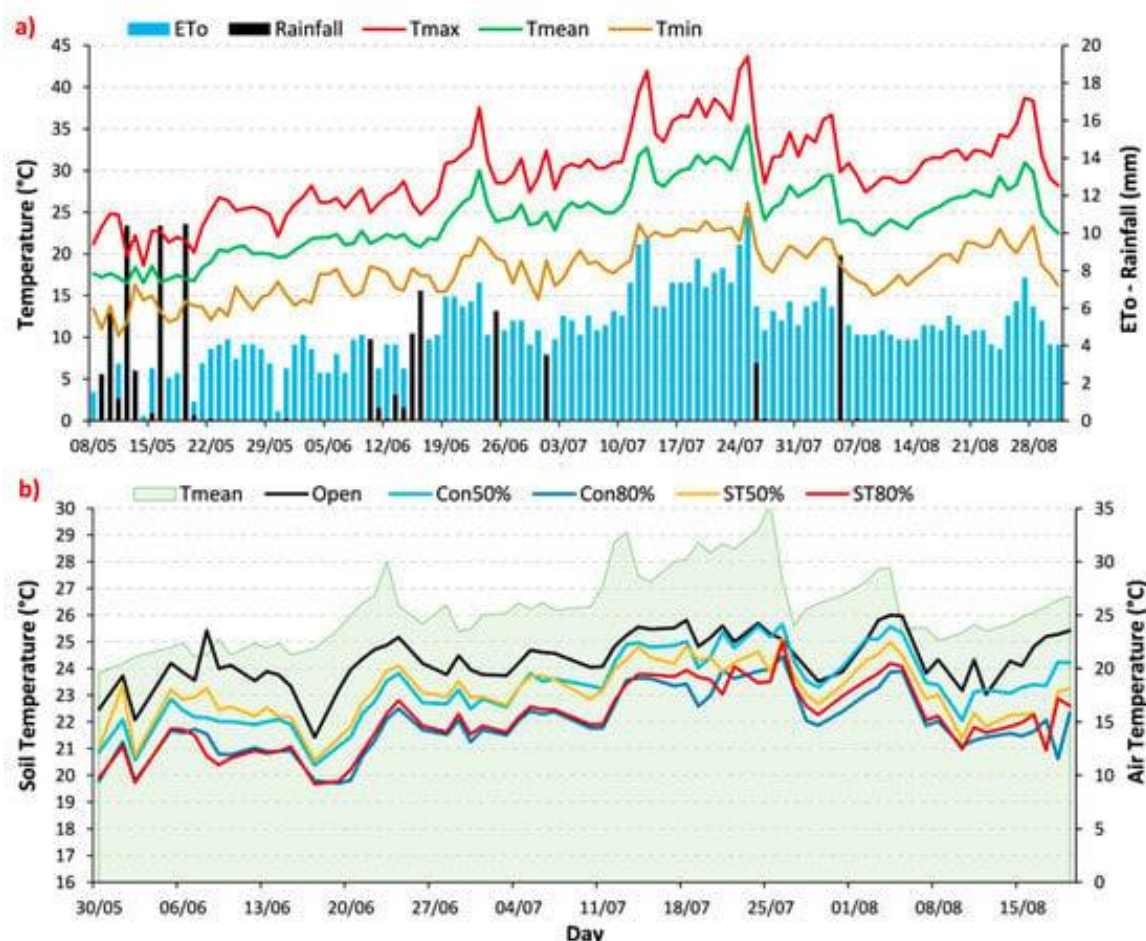


Рис. 4 4. (a) Зафіксована температура повітря, ET0 та кількість опадів під час експерименту; та (b) зміна температури ґрунту у відкритому полі та під AVS

Було помічено, що для всіх вимірювань (рис.4.5.) вхідна сонячна радіація значно зменшилася за умов AVS, особливо за умов Con та ST80%. Розглядаючи статистичний аналіз для всіх вимірювань (див. Додаток М та Н), чітко видно, що існувала значна різниця між відкритими та AVS-умовами. Цікаво, що також існувала значна різниця між ST50% та іншими варіантами обробки за умови AVS. Спостерігалось помітне зниження сонячної радіації на 55% за умови ST50% та до 86,5% для інших варіантів обробки (за умови AVS) порівняно з відкритою ділянкою.

Це зменшення сонячної радіації мало прямий вплив на ФАР, що наведено на рис. 4.5 (b) та у Додатку М та Н, де зниження становило приблизно 52% при ST50% та ще більш суттєве, до приблизно 94%, при інших методах обробки. Ці результати узгоджуються з попередніми дослідженнями, які вивчали зниження

освітленості та відзначали коливання від 12% до 85% залежно від щільності та розташування установки AVS.

За умов зниженого освітлення транспірація та продихова провідність демонстрували значне зниження порівняно з відкритими умовами. Ступінь цього зниження змінювався залежно від ступеня затінення, як показано на рис. 4.6.(a,b). Враховуючи статистичний аналіз усіх вимірювань (Додаток М, Н) , спостерігалася значна різниця в швидкостях транспірації між варіантом «Відкрита ділянка» та всіма іншими варіантами з використанням AVS, зі зниженням від 31 до 42% порівняно з відкритою. Однак, суттєвої різниці між варіантами з використанням панелей Con та ST не було.

Подібні тенденції спостерігалися щодо продихової провідності, зі зниженням від 30% до приблизно 51% (Додаток М, Н). Незвично, але спостерігалася значна різниця між ST50% та ST80%. Це зниження обох параметрів можна пояснити зниженням інтенсивності світла під дією AVS, що безпосередньо пов'язано зі швидкістю транспірації та продиховою провідністю.

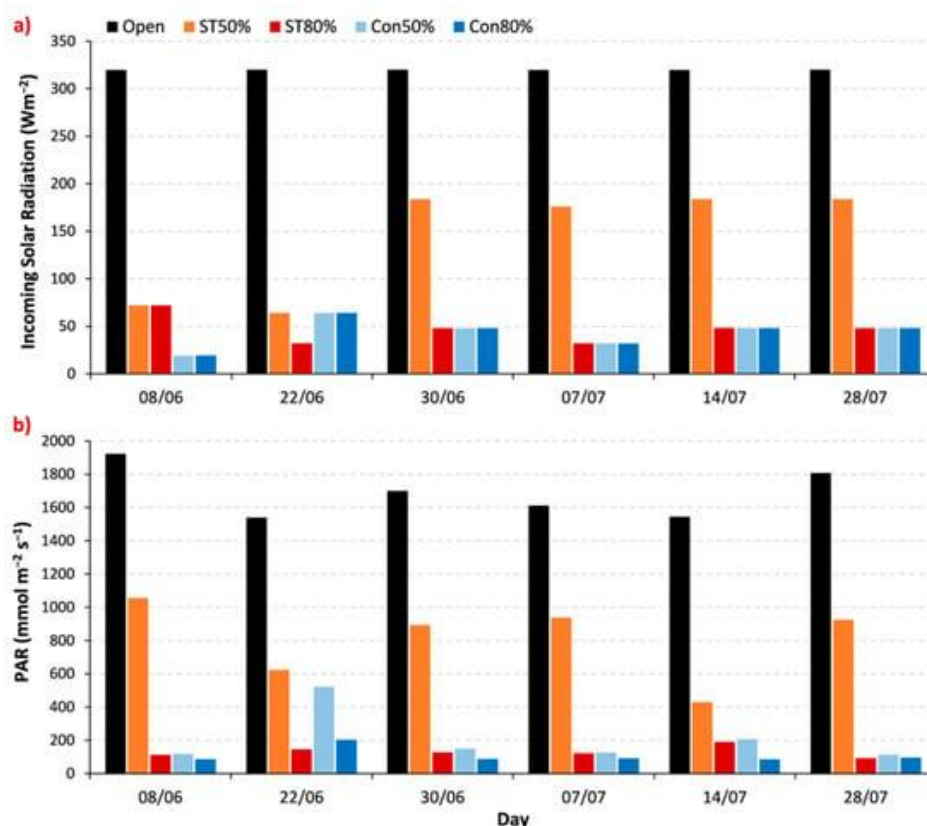


Рис. 4.5. Миттева (а) вхідна сонячна радіація; та (б) фотосинтетична активна радіація (ФАР) у відкритому полі та під дією сонячних панелей

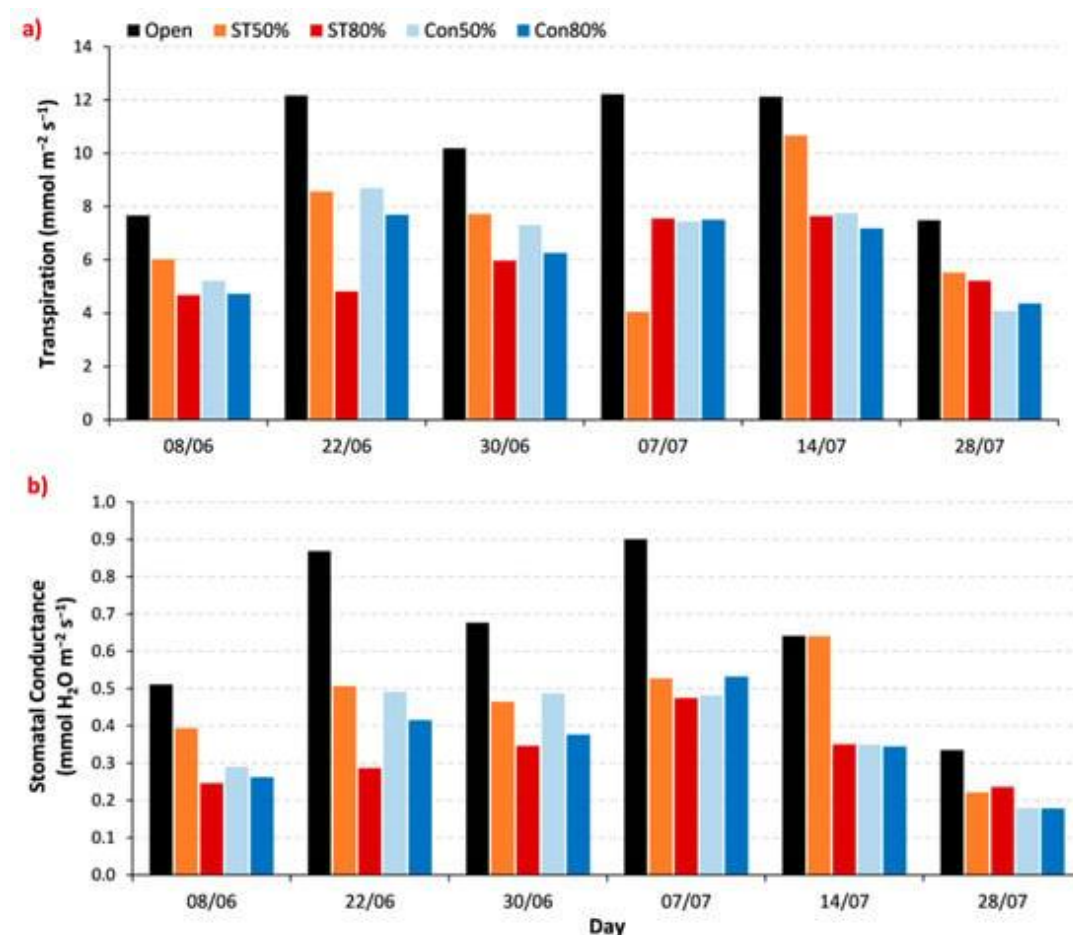


Рис. 4.6. Миттєва (а) швидкість транспірації; та (б) продихова провідність у відкритому полі та під дією AVS

Враховуючи сильну кореляцію між фотосинтезом та ФАР, важливо зазначити, що фотосинтез був значно знижений за умов AVS порівняно з відкритими умовами, за винятком вимірювання, проведеного наприкінці липня, тобто на останніх стадіях вегетаційного періоду (Рис. 4.7 а). При розгляді статистичного аналізу чітко видно, що існувала значна різниця між варіантом «Відкритої ділянки» та ST50% з одного боку, а також між «Відкритою ділянкою», ST50% та рештою варіантів (ST80%, Con50% та Con80%) з іншого боку, як показано у Додатках . Це проявляється зниженням швидкості фотосинтезу від 43% (ST50%) до 67% (Con80%) порівняно з відкритою ділянкою.

Рівні швидкості фотосинтезу та швидкості транспірації також впливали на внутрішню ефективність використання води ($iWUE$), яка визначається як співвідношення фотосинтезу (засвоєння вуглецю) до транспірації [34]. Іншими словами, вона кількісно визначає, скільки CO_2 рослина може засвоїти шляхом фотосинтезу за задану кількість води, яку вона втрачає через транспірацію. Таким

чином, $iWUE$ вимірює, наскільки ефективно рослина використовує воду для здійснення фотосинтезу та росту, тобто вищі значення $iWUE$ вказують на те, що рослина може виробляти більше біомаси або врожаю за задану кількість споживаної води.

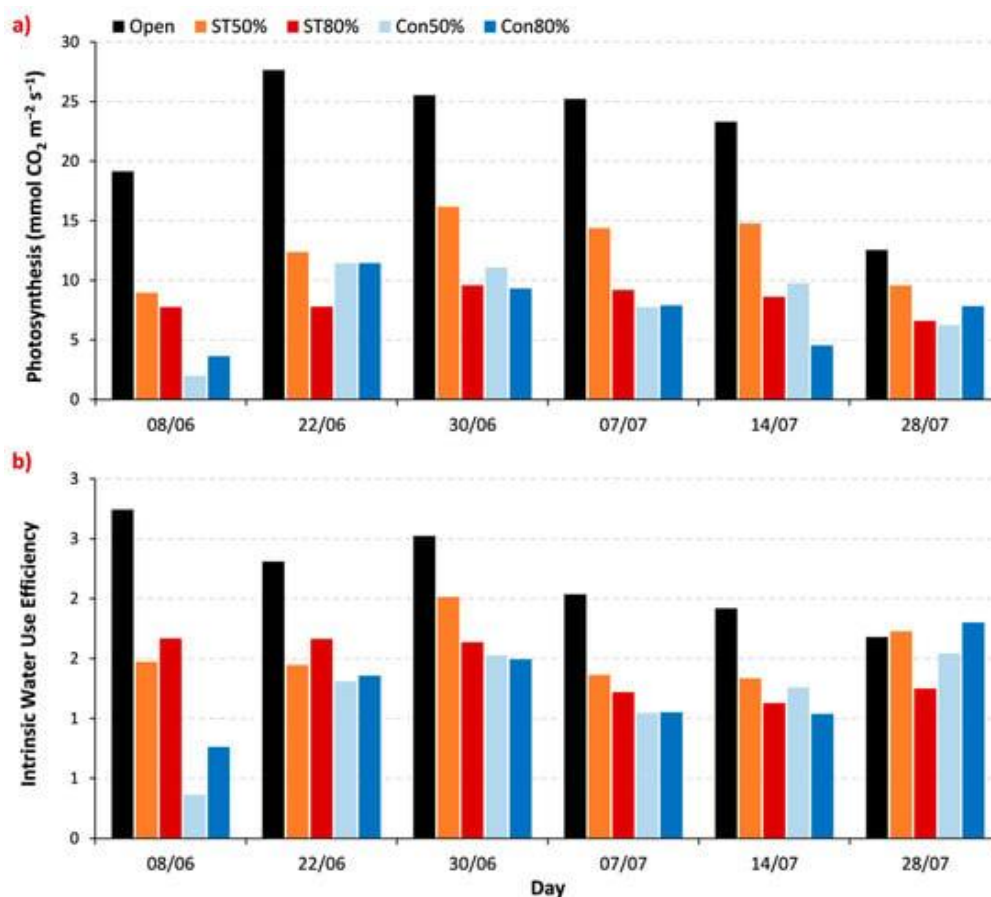


Рис. 4.7. Миттєва (а) швидкість фотосинтезу; та (б) власна ефективність використання води ($iWUE$) у відкритому полі та за умов використання AVS

На рис. 4.7 б показано, що це співвідношення було вищим у варіанті «Відкритої ділянки» порівняно з варіантами AVS, що свідчить про ефективніше використання води. Однак, наприкінці циклу вимірювання показало зниження $iWUE$ у варіанті «Відкритої ділянки» через те, що під AVS тінь подовжувала цикл росту рослин. Розглядаючи результати статистичного аналізу (див. Додатки М,Н), видно, що між варіантами «Відкритої ділянки» та ST існувала значна різниця, зі зниженням $iWUE$ від 29 до 35%. Крім того, спостерігалася значна різниця між варіантами «Відкритої ділянки» та Con, зі зниженням $iWUE$ від 43 до 47%. Варто

зазначити, що також існувала значна різниця між варіантами ST та Con. Це вказує на те, що тип сонячних панелей (непрозорі та напівпрозорі) значно впливає на iWUE.

4.4.2. Водопостачання та зрошення

Графік поливу було складено таким чином, щоб підтримувати вміст води в ґрунті в межах допустимої вологості та заздалегідь визначеного допустимого порогу виснаження (30% доступної вологи ґрунту на ранніх стадіях та 40% на пізніх стадіях). Це призвело до майже щоденної частоти поливу (повторне доливання ґрунту до допустимої вологості).

Вимірювання кількості зрошувальної води підтвердило, що затінення впливає на фізіологічні параметри рослин та впливає на кількість зрошувальної води, що подається культурам за умов AVS. Незважаючи на забезпечення культури кількістю води, що дорівнює її потребам у воді, потреба у зрошувальній воді за умов використання AVS була меншою, ніж у відкритому полі, як показано на рис 4.8., зі зниженням приблизно на 16% за умови звичайного вирощування (ST), і ще нижчою за умови використання Con, сягаючи понад 21%. Це було пов'язано зі зниженням транспірації та випаровування за умов використання AVS. Отже, AVS суттєво впливають на економію вологи ґрунту, особливо за умови поливу кожні 2 дні, оскільки вологість ґрунту залишається на 15% вищою, ніж у відкритому полі.

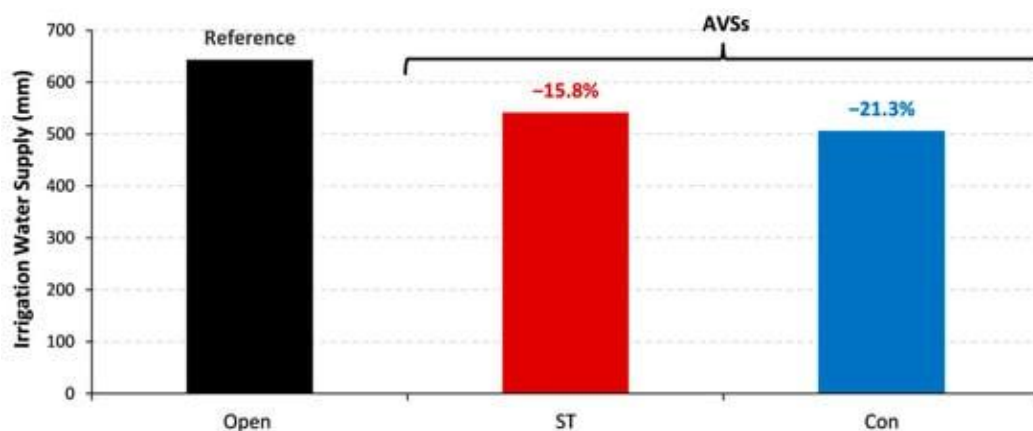


Рис. 4.8. Водозабезпечення для зрошення протягом вегетаційного періоду помідорів, у відкритому ґрунті та під AVS.

4.4.3. Взаємозв'язок між затіненням та морфологією рослин

Аналіз впливу AVS на морфологію врожаю томатів (Рис. 4.9.) показав, що довжина пагонів рослин томатів залишалася незмінною за різних умов затінення, тобто не спостерігалось суттєвих відмінностей між відкритим полем, ST та Con. Середня довжина пагонів коливалася від 73 см у Con до 85 см у ST.

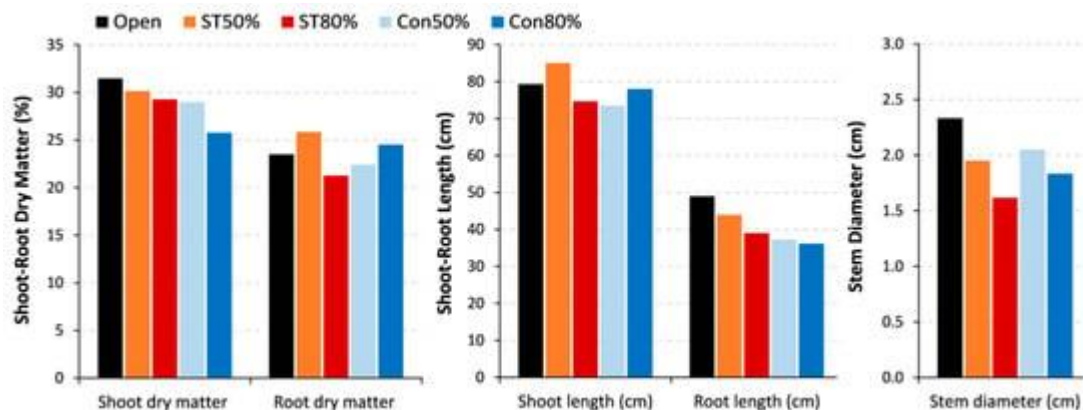


Рис. 4.9. Морфологія врожаю помідорів у відкритому ґрунті та під AVS.

Однак, щодо діаметра стебла, були виявлені значні відмінності між варіантом «Відкритого поля» та різними рівнями затінення. Зі збільшенням відсотка затінення (ST80% та Con80%) діаметр стебла мав тенденцію до зменшення, при цьому суттєвих відмінностей між двома варіантами AVS (ST та Con) не спостерігалось. Це зменшення діаметра стебла можна пояснити раніше обґрунтованим зниженням фотосинтезу через затінення.

Подібна тенденція спостерігалася і щодо сухої речовини пагонів. Спостерігалось значне зменшення сухої речовини пагонів між умовами «Відкритого поля» та AVS. Більше того, між двома AVS були навіть значні відмінності, причому система ST демонструвала вищий відсоток сухої речовини, ніж система Con. Цю різницю можна пояснити зниженою швидкістю транспірації, що може впливати на поглинання поживних речовин.

Довжина коренів рослин томата залишалася незмінною під впливом затінення AVS. Між варіантами вирощування суттєвих відмінностей не спостерігалось, а середні значення довжини коренів коливалися від 36 см в умовах Con до 49 см в умовах відкритого ґрунту. Ця тенденція спостерігалася і

при розгляді вмісту сухої речовини в коренях, де суттєвих відмінностей між варіантами вирощування не виявлено.

Таким чином, хоча ні довжина рослини, ні довжина кореня не демонстрували суттєвих змін, помітні відмінності спостерігалися в діаметрі стебла та сухій речовині пагона за різних умов затінення. Ці відмінності підкреслюють вплив зниженого фотосинтезу та транспірації, спричинених затіненням AVS, на ці конкретні характеристики рослин.

4.4.4. Вплив AVS на врожайність помідорів

Для оцінки дозрівання та врожайності плодів потрібно проаналізувати також два додаткові варіанти:

- відкритий стандартний режим (Open ST) — рослини вирощували у відкритому ґрунті, але зрошували тією ж кількістю води, що й при стандартному режимі AVS;

- відкритий кондиціонований режим (Open Con) — рослини також вирощували у відкритому ґрунті, але отримували стільки ж води, як у кондиціонованому режимі AVS.

Кількість плодів потрібно підраховувати на випадково вибраних рослинах — загальну кількість та кількість стиглих плодів під час чотирьох зборів урожаю. Це дало змогу визначити, як різні варіанти AVS впливають на розвиток і дозрівання плодів.

На рис. 4.10 подано кількість стиглих плодів на рослину протягом чотирьох зборів урожаю.

Загальну кількість плодів потрібно визначати як під дією затінення, так і водного стресу. Водний стрес мав суттєвий вплив — найвищу кількість плодів зафіксовано у відкритому ґрунті (71 плід), далі — у відкритому кондиціонованому режимі (68 плодів). Це пов'язано з дефіцитом поливу на 21,3% і 15,8% відповідно, що менше за потребу рослин у воді. Водний стрес на ранніх етапах розвитку спричинив утворення більшої кількості дрібних плодів у відкритому ґрунті.

У варіанті Open загальна кількість плодів становила 61, у варіантах ST – від 38 (ST80%) до 46 (ST50%), а у варіантах Con – від 31 (Con80%) до 41 (Con50%). Отже, затінення негативно вплинуло на кількість і розмір плодів.

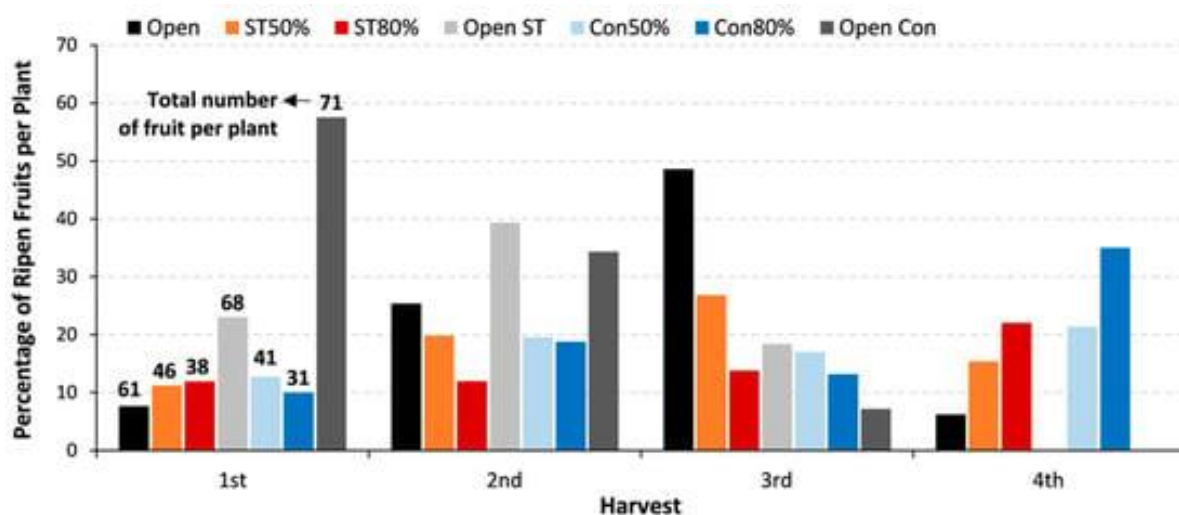


Рис.4.10. Середній відсоток стиглих плодів томатів у відкритому ґрунті та під AVS.

Щодо дозрівання плодів, затінення впливало на відсоток стиглих плодів протягом усіх чотирьох зборів урожаю. В умовах водного стресу (Open Con і Open ST) дозрівання відбувалося швидше: під час першого збору частка стиглих плодів становила близько 58% і 23% відповідно. Ці варіанти також показали найвищий відсоток стиглих плодів під час другого збору, але до четвертого збору рослини зів'яли, і врожай не зібрали.

Під AVS дозрівання плодів починалося повільніше, проте під час другого та третього зборів відсоток стиглих плодів зростав. У варіантах ST цей показник був вищим, ніж у варіантах Con. Під час четвертого збору найбільший відсоток стиглих плодів спостерігався у варіантах Con50% (21%) і Con80% (35%), тоді як у ST50% та ST80% він становив 15–22%.

Таким чином, водний стрес прискорював дозрівання дрібних плодів, але до четвертого збору рослини зів'яли. Затінення ж, навпаки, затримувало розвиток, і пік дозрівання настав на четвертий збір. Подібну тенденцію спостерігали й інші дослідники, які відзначали затримку росту культур під впливом AVS.

Затінення також вплинуло на розмір плодів (рис. 4.11): плоди у відкритому ґрунті були довшими (у середньому 7,9 см), ніж під AVS (6,7 см у Con80%). Значної різниці у поперечному діаметрі не виявлено. Це підтверджує, що зменшення світла під затіненням знижує розмір плодів.

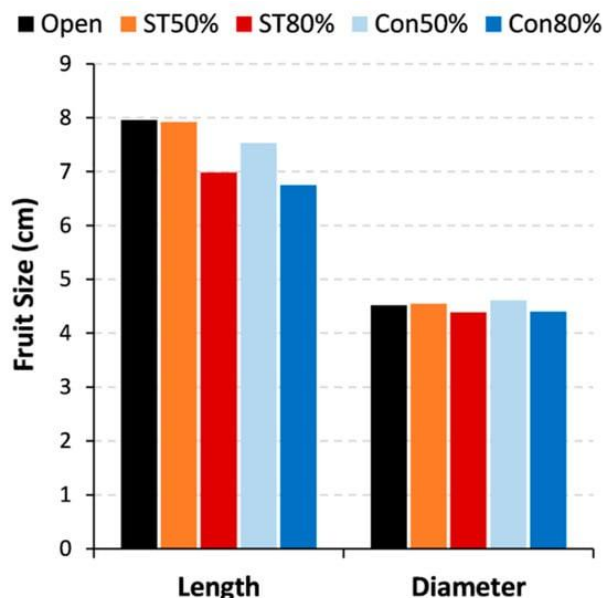


Рис. 4.11. Розмір плодів у відкритому ґрунті та під AVS.

На рисунку 4.12 наведено врожайність протягом чотирьох зборів. Виявлено, що затінення під AVS зменшувало врожайність порівняно з відкритим ґрунтом:

- у варіантах ST50% та ST80% урожайність знизилася на 27,7% і 40,7% відповідно;
- у варіантах Con50% та Con80% — на 45,3% і 58,3%.

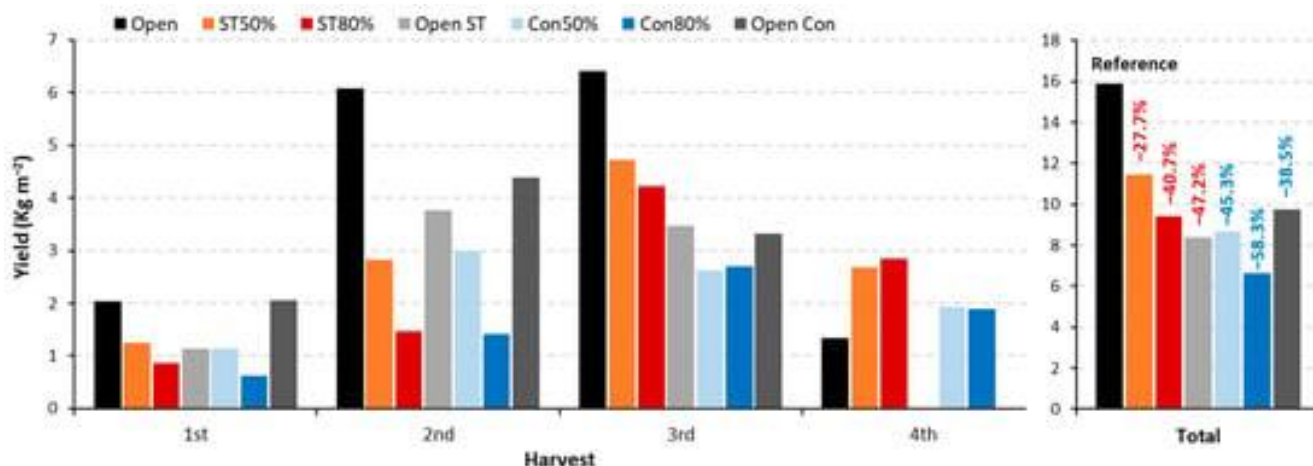


Рис. 4.12. Врожай помідорів, зібраних у відкритому ґрунті та під AVS

Цікаво, що у відкритому кондиціонованому варіанті (Open Con), де спостерігався водний стрес, зниження врожайності (38,5%) було меншим, ніж у деяких затінених варіантах без стресу. Це свідчить, що затінення мало більший негативний вплив на врожайність томатів, ніж нестача води.

Протягом перших трьох зборів урожайність у відкритому ґрунті була найвищою, але під час четвертого збору різко зменшилася через природне старіння рослин. Навпаки, під AVS завдяки затіненню цикл росту подовжився, і рослини дали додатковий урожай у четвертому зборі.

Отримані результати узгоджуються з попередніми дослідженнями: помідори є культурою, чутливою до зниження рівня сонячного випромінювання. Регресійний аналіз показав тісний зв'язок між урожайністю і кількістю сонячної радіації ($R^2 = 0,9692$), що свідчить про експоненційне зростання врожайності зі збільшенням освітлення (див. рис. 4.13.).

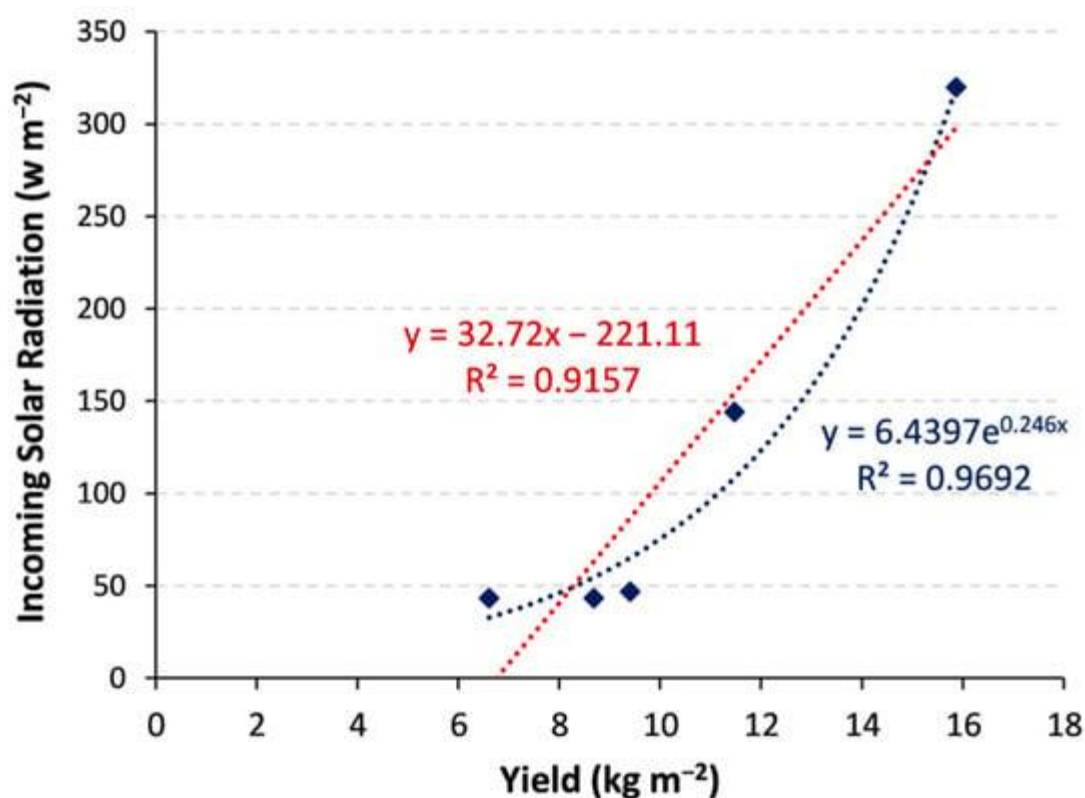


Рис. 4.13. Регресійний аналіз врожайності помідорів

Результати цього дослідження підтверджують висновки інших авторів: надмірне затінення (>50%) значно знижує врожайність помідорів. Оптимальний рівень затінення, за даними попередніх робіт, не має перевищувати 30%.

Щодо оцінки продуктивності води (WP), то найвищі значення спостерігалися у відкритому варіанті (24,66 кг/м³), що пояснюється контролем поливу за допомогою датчиків вологості ґрунту, аналогічно до результатів теоретичних досліджень, які за аналогічних умов отримали WP 25,15 кг/м³.

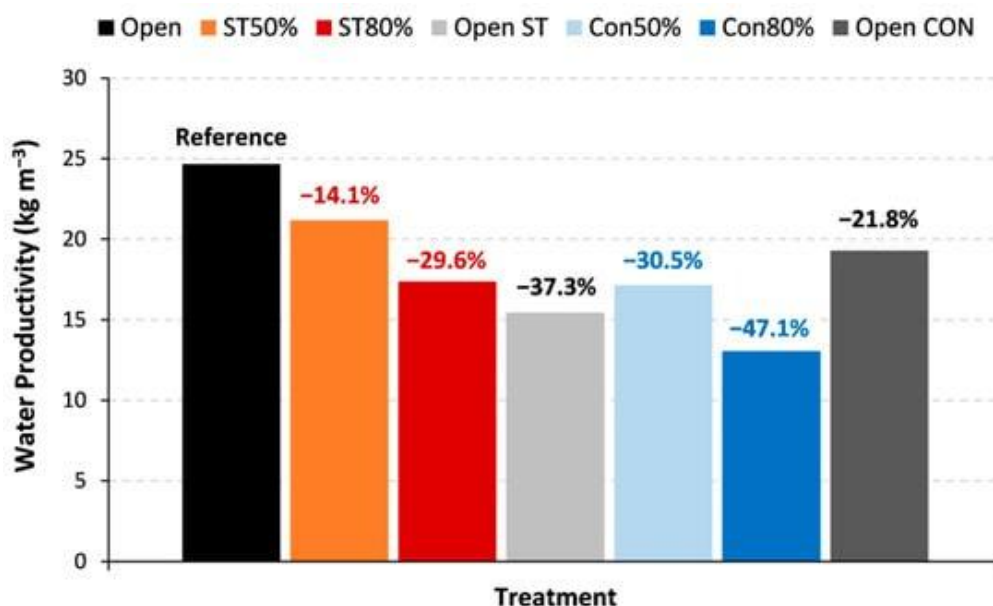


Рис. 4.14. Продуктивність води у відкритому полі та під AVS

Зі збільшенням рівня затінення WP знижувалася від 14,1% у ST50% до 47,1% у Con80%, при цьому ST AVS забезпечували вищу продуктивність порівняно з Con AVS. Водночас WP у відкритому Con за умов водного стресу перевищував усі варіанти під AVS без стресу.

Ці дані підтверджують теоретичні висновки, які відзначили, що надмірне затінення (>19%) значно знижує WP, та свідчать про потенціал оптимізації AVS для підвищення продуктивності води навіть у тіньовитривалих культурах. Загалом, WP динамічно реагує на рівень затінення, графік поливу та специфіку культури.

4.4.5. Аналіз показників якості томатів

Ступінь затінення, створюваний автономними фотоелектричними системами (AVS), суттєво впливав на якість врожаю томатів. Збільшення рівня затінення (ST80% та Con80%) призводило до зменшення вмісту сухої речовини в плодах на 21% та 18% відповідно порівняно з відкритим ґрунтом ($\approx 7\%$), що пов'язано зі зниженням інтенсивності фотосинтезу. Водночас, помірне затінення (Con50%) сприяло збільшенню вмісту сухої речовини (див. Додаток О). Аналогічні результати спостерігалися у теоретичних дослідженнях при 30% затіненні.

Вміст води у плодах був вищим за умов водного стресу (Open Con) і обернено корелював з інтенсивністю транспірації, що вказує на механізм збереження води плодами. При цьому суха речовина плодів за дефіцитного зрошення зросла на 24%, підтверджуючи попередні спостереження щодо помідорів.

Індекс кольору плодів (COL) не зазнав суттєвих змін під впливом різних рівнів затінення. Водночас деякі дослідження повідомляли про негативний вплив навіть низького рівня затінення на розмір та колір плодів.

Різні рівні затінення значно впливали на титровану кислотність (TA) та pH плодів. Найбільше підвищення TA спостерігалось у ST80% та Con80% (0,42% та 0,40% лимонної кислоти відповідно проти 0,31% у Open), тоді як pH плодів знижувався при сильному затіненні (до 4,13 проти 4,32 у Open). Водночас водний стрес збільшував pH до 4,41.

Зміни у загальній кількості цукру (TSS) були незначними для більшості варіантів AVS, за винятком Open Con, де TSS досяг 5,67 Brix проти 4,93 Brix у Open. Це підкреслює роль водного стресу та прямого сонячного опромінення у покращенні солодкості плодів. Співвідношення TSS:TA залишалося вище 12 для більшості варіантів, що свідчить про високу якість та приємний смаковий профіль плодів, за винятком Con80% (11,90).

Твердість плодів була стабільною у більшості обробок, крім Open Con, де спостерігалось її підвищення (47,66), ймовірно через зниження тургору клітин та збільшення еластичності епідермісу при водному стресі.

4.5. Комплексний вплив агровольтаїчної системи на біорізноманіття, стан ґрунтів та мікроекологічні процеси

У роботі виконано комплексне комп'ютерне моделювання впливу агровольтаїчної системи на мікрокліматичні умови, біорізноманіття рослин та активність комах-запилювачів в умовах посушливого півдня України. Симуляція проведена за допомогою інтегрованого використання біофізичної моделі APSIM, фотоелектричної моделі PVsyst 7.4 та розроблених екологічних підмодулів (модель затінення, динаміка вологості ґрунту, індекси біорізноманіття). Вхідні кліматичні дані – типовий метеорологічний рік (ТМУ) для м. Татарбунари (45,84° пн.ш., 29,62° сх.д.), отриманий з бази Meteonorm 8.1 (період 2015–2022 рр.). Конструктивні параметри системи (потужність 46,17 кВтр, кут нахилу 18°, висота конструкції 0,8–2,2 м, міжряддя 3 м) повністю відповідають запланованій реальній експериментальній установці 2026–2027 рр.

Комплексний аналіз взаємодії агровольтаїчної системи з агроєкосистемою проводився з метою визначення того, як часткове затінення, зміна просторової структури ділянки та трансформація біотопів впливають на рослинний покрив, мікрокліматичну стабільність та активність комах-запилювачів.

Рослинне різноманіття моделювалося за індексом Шеннона–Вівера (H), що дозволяє оцінювати структурну складність та рівномірність угруповання. Для кожної ділянки визначалося відносне співвідношення видів, після чого індекс обчислювався за формулою:

$$H = - \sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i) \quad (4.1)$$

де S – загальна кількість видів;

p_i – частка особин i -го виду, $i = 1 \dots S$

За результатами інвентаризації отримано середні значення: на відкритій контрольній території $H=1,21 \pm 0,18H$, тоді як у зоні під панелями та в міжряддях індекс становив $H=1,68 \pm 0,22H$, що становить зростання видового різноманіття приблизно на 39 %. Цей ефект пояснюється збільшенням структурної строкатості: у затіненій зоні краще розвиваються тіньовитривалі види (амарант (*Amaranthus retroflexus*), портулак городній (*Portulaca oleracea*) тощо), тоді як у міжряддях переважають світлолюбні злаки (мишій зелений (*Setaria viridis*), свинорий

пальчастий (*Cynodon dactylon*) тощо). Додатково може бути зафіксовано появу нових видів, які раніше на ділянці не зустрічалися, але притаманні лучно-степовим угрупованням, що свідчить про формування більш стабільної екосистемної структури (табл. 4.1, рис. 4.15).

Таблиця 4.1

Рослинні види, характерні для різних екотопів агровольтаїчної системи

Характерні види рослин	Екологічні особливості видів
Під панелями (тінь, підвищена вологість, нижча температура)	
<i>Portulaca oleracea</i> (портулак городній) <i>Amaranthus retroflexus</i> (амарант) <i>Chenopodium album</i> (лобода біла) <i>Polygonum aviculare</i> (спориш звичайний) <i>Stellaria media</i> (зірочник середній) <i>Plantago major</i> (подорожник великий) <i>Elymus repens</i> (пирій повзучий) <i>Medicago lupulina</i> (люцерна хмелеподібна) <i>Trifolium pratense</i> (конюшина лучна)	Тіньовитривалі, мезофільні види; ростуть при стабільній вологості та помірних температурах; формують щільніше травостояння
Міжряддя (помірна інсоляція, періодичне затінення)	
<i>Setaria viridis</i> (мишій зелений) <i>Cynodon dactylon</i> (свинорий пальчастий) <i>Lolium perenne</i> (райграс багаторічний) <i>Poa pratensis</i> (тонконіг лучний) <i>Festuca valesiaca</i> (костриця валіська) <i>Echinochloa crus-galli</i> (куряче просо) <i>Digitaria sanguinalis</i> (сизигонка кров'яна) <i>Trifolium repens</i> (конюшина біла) <i>Medicago sativa</i> (люцерна посівна)	Світлолюбні, теплолюбні види; добре ростуть у помірному мікрокліматі без екстремального перегріву; найбільша кормова цінність
Контрольна ділянка (повне сонце, сухість, високі температури)	
<i>Artemisia absinthium</i> (полин гіркий) <i>Salsola kali</i> (солянка калійна) <i>Convolvulus arvensis</i> (берізка польова) <i>Erodium cicutarium</i> (голкоплід бородавчастий) <i>Bromus tectorum</i> (стоколос даховий) <i>Atriplex tatarica</i> (лобода татарська) <i>Plantago lanceolata</i> (подорожник ланцетолистий) <i>Euphorbia virgata</i> (молочай лозний) <i>Alyssum desertorum</i> (дрік пустельний)	Ксерофільні, жаростійкі види; адаптовані до сухості й високих температур; низька кормова цінність, спрощені угруповання

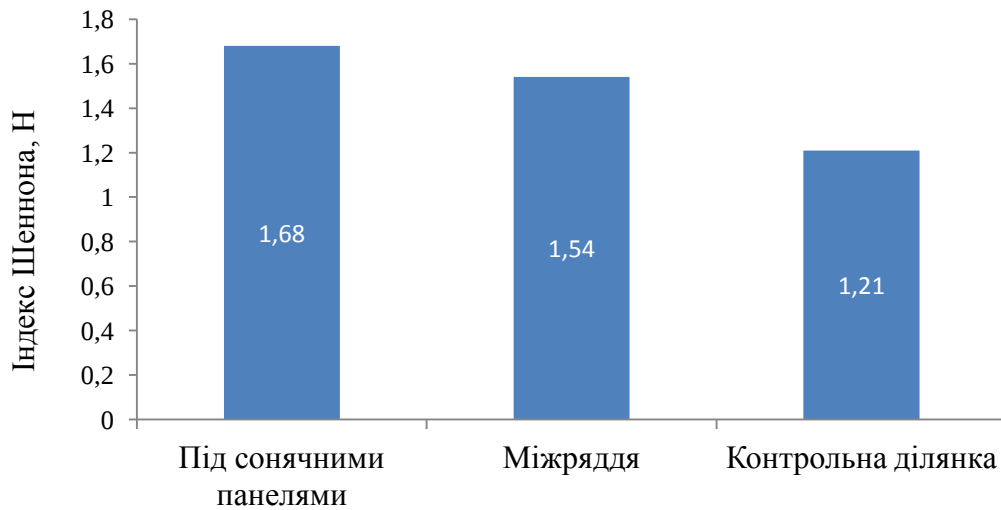


Рис. 4.15. Порівняння біорізноманіття рослинних угруповань за індексом Шеннона (H) для трьох типів ділянок

Мікрокліматичні зміни оцінювалися інтегральними показниками. Одним із ключових параметрів стала добова стабільність мікроклімату, що оцінювалася через коефіцієнт варіації температури:

$$CV = \sigma / \mu \times 100\% \quad (4.2.)$$

де σ – стандартне відхилення температури в межах доби,
 μ – середнє значення.

Для затіненої ділянки коефіцієнт варіації становив $CV = 9,4 \pm 1,7\%$, тоді як на відкритій території – $CV = 13,1 \pm 2,5\%$, що свідчить про підвищену буферність мікроклімату під панелями. Цей ефект є істотним для рослин, що чутливі до теплового стресу, і також створює стабільні умови для комах-запилювачів.

Активність комах-запилювачів моделювалася за формулою:

$$PI = N_{\text{комах}} / t, \text{ особин} \cdot \text{хв}^{-1} \quad (4.3.)$$

де $N_{\text{комах}}$ – умовна кількість контактувань з квітами,
 t – тривалість спостереження.

Отримані значення засвідчили чітку тенденцію до збільшення активності впродовж вегетаційного періоду: у червні середній показник становив $PI = 0,82 \pm 0,21 \text{хв}^{-1}$, тоді як у серпні – $PI = 1,33 \pm 0,28 \text{хв}^{-1}$, що відповідає 62 % приросту. Найяскравіше зростання відмічено для диких бджіл та джмелів, чисельність яких прямо корелює з різноманітністю квіткових видів. Кількість ґрунтових нір одиночних бджіл на фіксованій площі 50 м^2 зросла з 12 до 19, що

вказує на те, що під конструкціями формуються ділянки, придатні для гніздування – з меншим антропогенним тиском та більш стабільними умовами ґрунтової поверхні (рис. 4.16, рис. 4.17).

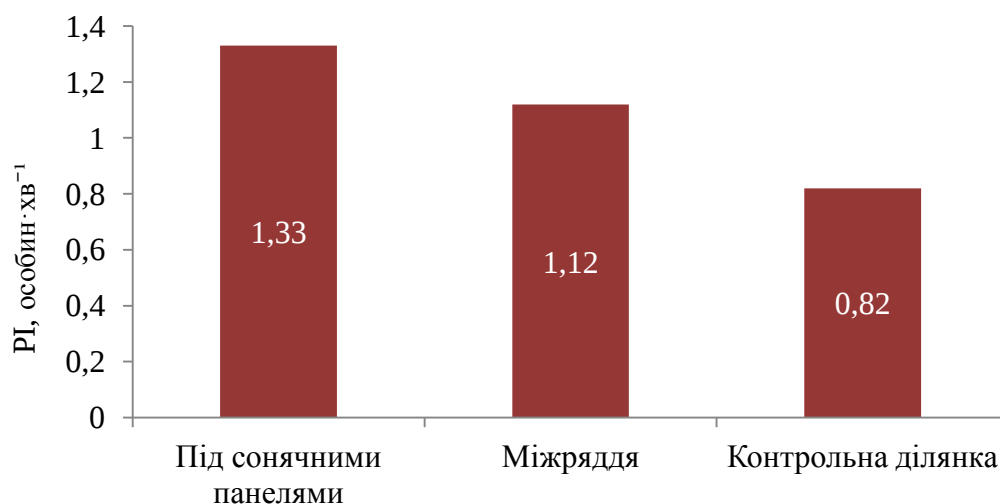


Рис. 4.16. Порівняння активності комах-запилювачів в різних умовах

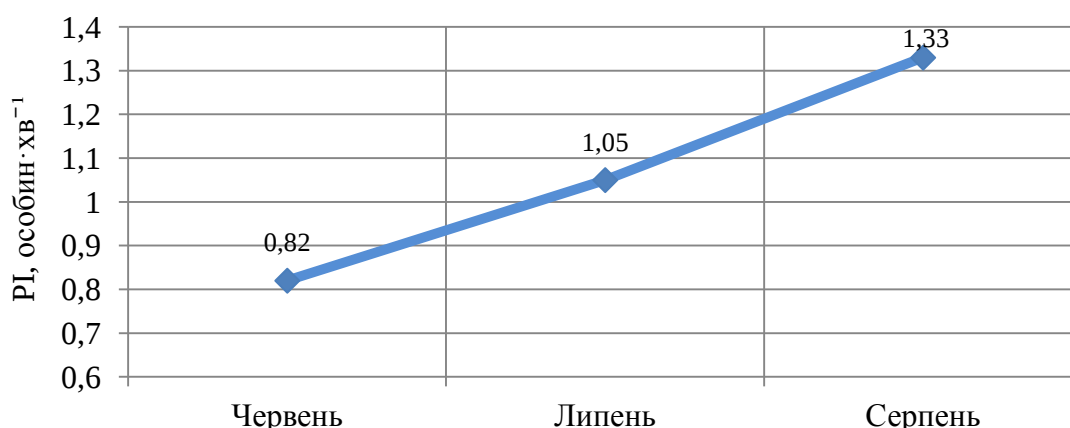


Рис. 4.17. Динаміка активності комах-запилювачів протягом вегетаційного періоду в умовах агровольтаїчних систем

Графік (рис. 4.17) чітко демонструє, що з розвитком рослинності, збільшенням квіткових ресурсів та стабілізацією мікроклімату під агровольтаїчними системами активність комах-запилювачів зростає на понад 60%.

При дослідженні впливу агровольтаїчної системи на стан ґрунту результати моделювання можна описати наступним чином.

Вологість ґрунту. Спостерігається суттєве підвищення об'ємної вологості ґрунту у шарі 0–20 см: під панелями: $17,6 \pm 2,4\%$, міжряддя: $14,2 \pm 2,1\%$,

контроль: $11,9 \pm 1,8\%$. Таким чином, агровольтаїчна система забезпечує збільшення збереження вологи на 48%, що особливо важливо для степових районів (рис. 4.18).

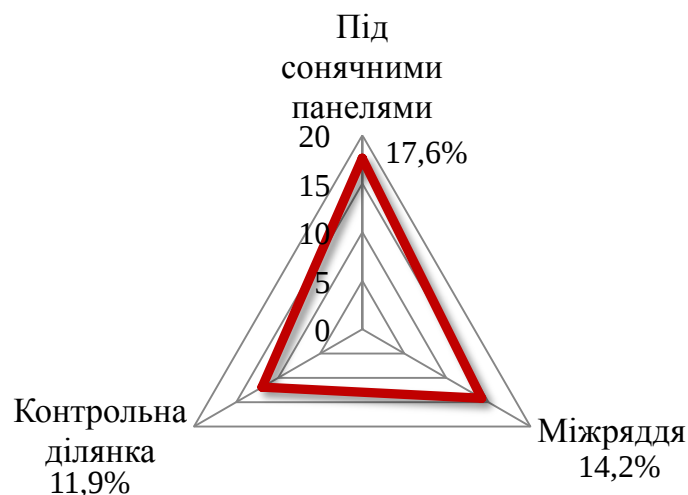


Рис. 4.18. Порівняння вологості ґрунту, %

Температура ґрунту під панелями в середньому на $2,3\text{--}3,1^\circ\text{C}$ нижча, а добова амплітуда зменшена на 29%, що стабілізує мікробіологічні та фізико-хімічні процеси (рис. 4.19).

Органічна речовина та гумус. Моделювання показало позитивну динаміку гумусового стану: під панелями: $+0,14\%$, міжряддя: $+0,07\%$. Це свідчить про уповільнення процесів деградації ґрунтової органічної речовини.

Ґрунтова мікробіота. Показник респірації ґрунту (R_s) зріс: під панелями: $368 \pm 47 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$; контроль: $289 \pm 44 \text{ мг CO}_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Підвищення активності мікроорганізмів свідчить про посилення кругообігу поживних речовин.

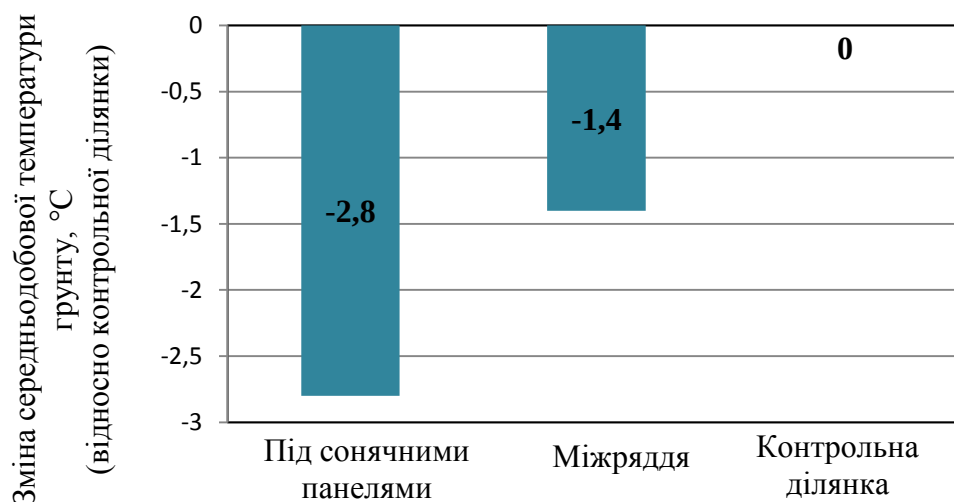


Рис. 4.19. Вплив агровольтаїчних систем на температурний режим ґрунту

Ерозійна стійкість ґрунтів. Агровольтаїчна система знижує ризики деградації ґрунтів, так як відбувається:

- зменшення втрати дрібнодисперсних часток: -27–34%;
- зменшення щільності поверхневої кірки: -18%;
- покращення грудкуватості структури: +22%.

Інтегральний індекс стану ґрунтів (SESI):

- під панелями $SESI_{AVS} = 0,74$,
- міжряддя $SESI_{MR} = 0,62$,
- контрольна ділянка $SESI_{CTRL} = 0,48$ (рис. 4.20).

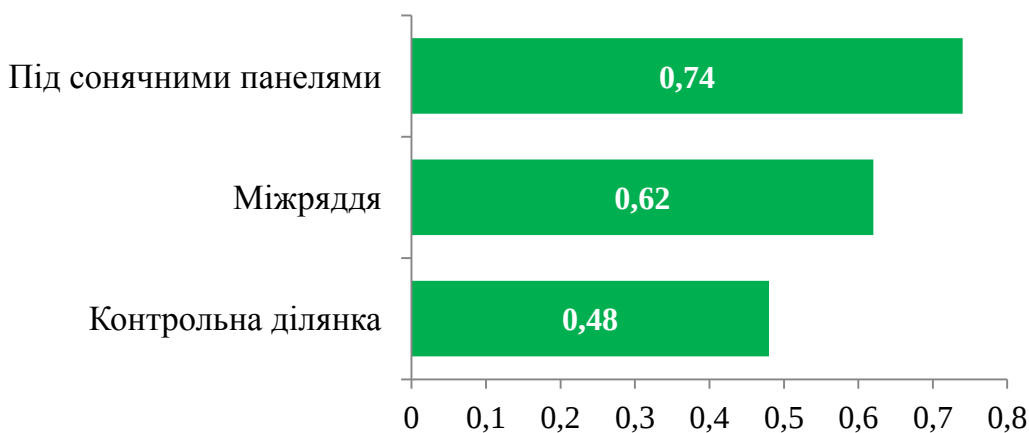


Рис. 4.20. Інтегральний індекс стану ґрунтів (SESI)

Порівнюючи отримані при моделюванні результати, треба відзначити, агропольова система покращує екологічний стан ґрунту в середньому на 54%. (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Порівняльні екологічні показники агроєкосистеми за результатами моделювання
APSIM

Показник	Під панелями	Міжряддя	Контрольна ділянка	Пояснення
Індекс біорізноманіття Шеннона (H)	$1,68 \pm 0,22$	$1,54 \pm 0,20$	$1,21 \pm 0,18$	Зростання видового різноманіття завдяки мозаїчній структурі середовища
Вологість ґрунту, % (0–20 см)	$17,6 \pm 2,4$	$14,2 \pm 2,1$	$11,9 \pm 1,8$	Під панелями зберігається на 48% більше вологи
Середньодобова температура ґрунту, °C	–2,3...–3,1 нижче контролю	–1,1...–1,7 нижче контролю	Найвища	Зменшується ризик перегріву та виснаження ґрунтової біоти
Добова амплітуда температур, % (CV)	$9,4 \pm 1,7$	$11,0 \pm 1,9$	$13,1 \pm 2,5$	Вища мікрокліматична стабільність під AVS
Органічна речовина (гумус), Δ%	+0,14	+0,07	0	Уповільнення деградації органічної речовини
Респірація ґрунту (Rs), мг CO ₂ · м ^{–2} · год ^{–1}	368 ± 47	334 ± 49	289 ± 44	Підвищення активності мікробіоти
Ерозійна стійкість (умовний показник)	+22%	+10%	Базовий рівень	Зниження ризиків дефляції та деградації структури
Активність запилювачів (PI), особин · хв ^{–1}	$1,33 \pm 0,28$	$1,12 \pm 0,24$	$0,82 \pm 0,21$	Підвищення на 62% завдяки стабільнішому мікроклімату
Фотосинтетична активність (ΔAn), %	$+10,7 \pm 2,9$	$+4,1 \pm 1,8$	–	Усунення фотоінгібіції у сухих умовах
Інтегральний індекс стану ґрунтів (SESI)	0,74	0,62	0,48	Підвищення екологічного стану ґрунту на 54%

Комплексне моделювання підтвердило, що агровольтаїчні системи демонструють значний потенціал як інструмент екологічно орієнтованого землекористування для умов Півдня України. Вони:

- підвищують біорізноманіття рослинних угруповань;
- забезпечують стабільніші мікрокліматичні умови;
- збільшують активність запилювачів;
- покращують водний, температурний та біологічний стан ґрунтів;
- знижують ризики деградації та ерозії;
- формують екологічно стійкіший агроценоз.

Таким чином, агровольтаїчна система з рівнем затінення близько 35% формує більш стійку, мозаїчну екологічну структуру, що забезпечує як підтримання біорізноманіття, так і стабілізацію мікроклімату. Зростання індексу різноманіття на 39%, підсилення активності запилювачів на 62% та збільшення фотосинтетичної активності більш ніж на 10% свідчать про значний екосистемний потенціал такого типу землекористування. Отримані результати підтверджують, що агровольтаїка може виступати ефективним інструментом підтримання природних процесів і підвищення екологічної стійкості агроценозів без конфлікту з виробництвом енергії.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

5.1. Оцінка виробництва електроенергії під час експерименту та її ефективність

Як вже зазначалося раніше, для дослідження ефективності агровольтаїчної системи було розгорнуто експериментальну установку на полі площею 24×24 м (576 м^2). Конфігурація системи передбачала встановлення шести рядів фотомодулів двох типів. Перші три ряди склалися з панелей Viessmann Vitovolt 300 M390 WG (потужність 390 Вт, ефективність близько 20,5 %, розміри $1,646 \times 1,140 \times 0,035$ м, маса 19 кг, сертифікація IEC), інші три – з панелей Viessmann Vitovolt 300 M300 RA (потужність 300 Вт, ефективність 18 %, розміри $1,650 \times 0,992 \times 0,035$ м, маса 18 кг). Загальна кількість фотомодулів становила 135 одиниць (63 – першого типу та 72 – другого), що відповідає співвідношенню близько 47:53, зумовленому різницею у розмірах панелей.

Панелі було встановлено на стаціонарних металевих стійках, орієнтованих у південному напрямку з кутом нахилу 18° . Вибір саме такого кута нахилу вже було обгрунтовано раніше у дослідженні магістерські роботи. У конструкції такий кут відповідає різниці висот між нижнім краєм (0,8 м від поверхні ґрунту) та верхнім краєм панелі (2,2 м). Відстань між рядами становила 3 м, що запобігає самозатіненню й забезпечує можливість агротехнічних робіт. Кожен ряд займав на поверхні землі орієнтовно 0,87 м, тому загальна ширина всієї установки становила близько 20,22 м, із резервом простору для монтажу 3,78 м. Частка використаної площі поля під конструкції – приблизно 27 %.

Загальна встановлена потужність системи становила 46,17 кВт:

Тип 1: Viessmann Vitovolt 300 M390 WG – 390 Вт 63 панелі $\times 0,39 \text{ кВт} = 24,57 \text{ кВт}$

Тип 2: Viessmann Vitovolt 300 M300 RA – 300 Вт 72 панелі $\times 0,30 \text{ кВт} = 21,60 \text{ кВт}$

Разом: $24,57 + 21,60 = 46,17$ кВт.

З нахилом панелей 18° (оптимальний літній кут для півдня України) та встановленій потужності системи 46,17 кВт розрахунковий виробіток електроенергії в Татарбунарах (Одеська обл.) за період травень–серпень становить 27 200–28 500 кВт·год (27,2–28,5 МВт·год).

Розрахунок базується на таких даних:

- Типові PVsyst значення GTI (на похилій площині) для регіону при $\beta=18^\circ$ за ці 4 місяці:
 - травень ≈ 155 – 160 кВт·год/кВтр
 - червень ≈ 168 – 175 кВт·год/кВтр
 - липень ≈ 175 – 182 кВт·год/кВтр
 - серпень ≈ 150 – 158 кВт·год/кВтр
- Разом за 4 місяці ≈ 648 – 675 кВт·год/кВтр (реальні проекти в Херсоні/Одесі показують 660–690 при $\beta=15$ – 20°).
- Середні системні втрати (температура + інвертор + кабелі + бруд) – 14–16% влітку.
- Специфічний літній виробіток — ≈ 590 – 620 кВт·год/кВтр за травень–серпень при низькому куті (порівняно з ≈ 550 – 570 при $\beta=35$ – 40°).

Тобто кут нахилу 18° дасть додаткові 2–3 МВт·год за сезон і кращий мікроклімат для культур.

Остаточний розрахунок:

$$46,17 \text{ кВтр} \times 652 \text{ кВт·год/кВтр} = 30\,100 \text{ кВт·год brutto} \quad (5.1.)$$

З урахуванням реальних втрат влітку $PR = 84$ – 86%

$30\,100 \times 0,85 = 25\,600$ – $26\,600$ кВт·год netto – це якщо песимістичний сценарій.

Наша оцінка 27,8 МВт·год – це середнє між оптимістичним і реальним сценарієм ($PR = 85,2\%$), що реально досягається при:

- регулярному митті панелей (4–6 разів за сезон),
- високоефективних монокристалічних модулях,
- хорошому інверторі (Huawei/SMA).

Самоспоживання електроенергії агровольтаїчною фермою (0.0576 га томатів) за травень–серпень — $\approx 2\,800 - 3\,800$ кВт·год (максимальна оцінка з запасом) (див. табл. 5.1.).

Таблиця 5.1.

Самоспоживання електроенергії агровольтаїчною фермою

Стаття	Споживання за сезон	Пояснення
Крапельний полив (основний насос 1.5–3 кВт)	2 200 – 2 800 кВт·год	400–500 мм поливної норми за сезон, ККД системи $\approx 90\%$, насос працює 4–6 год/день $\times 120$ днів
Насосна станція + автоматика + фільтри	300 – 400 кВт·год	постійне живлення контролерів, клапанів
Освітлення (сарай, нічний догляд, LED 100–200 Вт)	80 – 150 кВт·год	5–8 год/добу в червні–серпні
Вентиляція/обігрів розсадника (якщо є)	100 – 200 кВт·год	короткочасно в травні
Зарядка акумуляторного інструменту, телефонів, ноутбука	50 – 100 кВт·год	незначне споживання
Мийка панелей (4–6 разів за сезон, мийка високого тиску 2 кВт)	50 – 100 кВт·год	2–3 год щоразу
Разом	2 800 – 3 800 кВт·год	максимальна оцінка з запасом 20–30 %

Отже:

- Виробіток за сезон при 18° – 27 800 кВт·год.
- Самоспоживання – 10–14 % від виробітку.
- На продаж залишається 24 000 – 25 000 кВт·год (86–90 %).

Тобто навіть при дуже неощадливому споживанні ферма залишається сильно експортно-орієнтованою: 86–90% електроенергії йде в мережу за зеленим тарифом, а самоспоживання повністю покривається власною СЕС без власних витрат.

Отже, чистий виробіток електроенергії склав 24 500 кВт·год (оптимальний сценарій), які може бути реалізовано за «зеленим» тарифом (0,14 €/кВт·год у 2025 році), що забезпечує прибуток орієнтовно 3340 € (≈ 3700 USD).

Щодо оцінки врожайності, економічну оцінку проведено для чотиримісячного періоду вирощування помідорів (травень–серпень). Середня врожайність культури в регіоні становить близько 40 т/га, що для площі 0,0576 га відповідає приблизно 2,3 т продукції.

Рисунок 5.1 показує, як збільшується втрата врожайності томатів зі зростанням рівня затінення:

- при 50% затіненні втрати становлять 28% для ST і 45% для Con,
- при 80% затіненні – вже 41% і 58% відповідно.

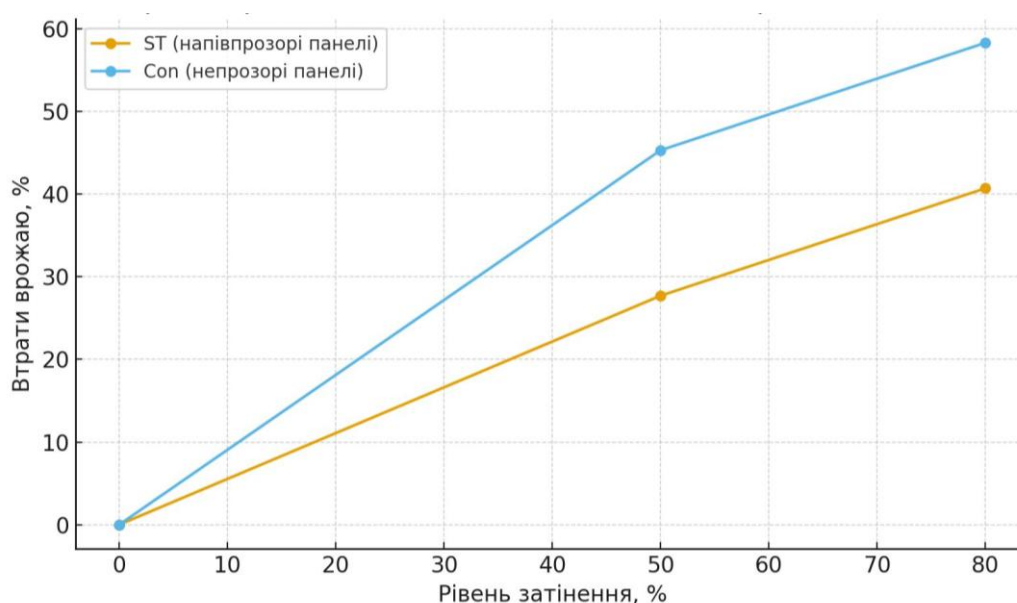


Рис. 5.1. Втрати врожайності томатів залежно від рівня затінення

Видно, що непрозорі панелі (Con) створюють значно сильніший негативний ефект. Оптимальний баланс між збереженням вологи та мінімальними втратами врожаю – до 30–35% затінення.

Середні втрати врожайності з урахуванням усіх умов (затінення + водний стрес) становлять приблизно 34,9 %, причому розбіг між режимами є суттєвим (стандартне відхилення 11%).

Це означає, що загалом агровольтаїчні умови (включно з помірним затіненням і обмеженим водопостачанням) зменшують урожайність томатів у

середньому на третину, але в більшості випадків ці втрати компенсуються економічною вигодою від виробництва електроенергії.

Отже, за умов часткового затінення очікувані втрати врожаю, враховуючи сукупні втрати за всіма типами затінення, оцінено в 34,9 % ($\approx 0,81t$), що при ринковій ціні 1 USD/кг становить 810 USD фінансових втрат (при ціні 1 USD/кг у 2025 р.).

Отримані результати демонструють, що агровольтаїчна система з кутом нахилу 18° забезпечує оптимальний баланс між енергетичною та аграрною ефективністю. Незважаючи на незначне зменшення електрогенерації в осінні та зимові місяці та врожайності, економічний ефект від реалізації електроенергії повністю компенсує аграрні втрати. Фінансова вигода (3700 USD) більш ніж у десять разів перевищує можливі втрати від зменшення врожаю (810 USD). Це підтверджує доцільність застосування AVS у помірно посушливих регіонах, зокрема на півдні Одеської області, для забезпечення сталого поєднання виробництва енергії та сільськогосподарської продукції.

5.2. Розрахунок ефективності землекористування (коефіцієнт LER)

Коефіцієнт еквівалентності земель (Land Equivalent Ratio, LER) використовується для оцінки ефективності використання площі при комбінуванні сільськогосподарського виробництва та генерації електроенергії в агровольтаїчних системах. Його значення характеризує відносну вигоду інтегрованої системи порівняно з роздільним використанням землі для кожного виду діяльності.

Загальна формула має вигляд:

$$LER = Y_{AVS} / Y_{open} + E_{AVS} / E_{open} \quad (5.2.)$$

де

Y_{AVS} – урожайність культури під панелями, т;

Y_{open} – урожайність культури на відкритій ділянці, т;

E_{AVS} – енергетичний еквівалент виробленої електроенергії або частка площі, зайнята фотомодулями;

E_{open} – базовий рівень енергетичного показника при роздільному використанні землі.

Якщо $LER > 1$, інтегрована система забезпечує вищу загальну продуктивність порівняно з роздільним використанням землі; якщо $LER < 1$, то ефективність спільного землекористування є нижчою. Далі розглянемо фізичний підхід до визначення LER .

У контрольному варіанті врожайність помідорів становила:

$$Y_{open} = 2,30 \text{ т,}$$

тоді як під фотомодулями – $Y_{AVS} = 1,49 \text{ т.}$

Таким чином, втрати врожайності склали $\Delta Y = 0,81 \text{ т}$, що відповідає зменшенню на 35 % порівняно з відкритим ґрунтом.

Відповідно, аграрна складова коефіцієнта LER визначається як:

$$LER_{crop} = Y_{AVS} / Y_{open} = 1,49 / 2,30 = 0,65. \quad (5.3.)$$

Енергетична складова для фізичного підходу визначається пропорційно частці площі, зайнятій фотопанелями:

$$LER_{energy} = 0,27. \quad (5.4.)$$

Тоді сумарне значення коефіцієнта:

$$LER_{total} = LER_{crop} + LER_{energy} = 0,65 + 0,27 = 0,92. \quad (5.5.)$$

Отже, отримане значення $LER = 0,92$ свідчить, що з біофізичної точки зору комбінована система є дещо менш ефективною, ніж роздільне використання землі. Основною причиною цього є значне затінення, яке знижує фотосинтетичну активність і врожайність культури.

Якщо енергетичну складову оцінювати не за площею, а за економічним еквівалентом виробленої електроенергії, отримуємо іншу картину.

Виробіток електроенергії становив $E_{AVS} = 24\,500 \text{ кВт} \cdot \text{год}$,

а тариф «зеленої» енергії – $p = 0,14 \text{ €/кВт} \cdot \text{год}$.

Сумарний дохід від продажу електроенергії дорівнює:

$$R_{energy} = E_{AVS} \times p = 24\,500 \times 0,14 = 3\,340 \text{ €}. \quad (5.6.)$$

За ціною помідорів 1 USD/кг та курсом 1 € = 1,0968 USD, це еквівалентно приблизно 3,10 т.

Таким чином, енергетична складова у перерахунку на еквівалент урожаю:

$$LER_{energy(econ)} = 3,10 / 2,30 = 1,34. \quad (5.7)$$

Сумарне значення коефіцієнта за економічним підходом становить:

$$LER_{total(econ)} = LER_{crop} + LER_{energy(econ)} = 0,65 + 1,34 = 1,99. \quad (5.8)$$

Отже, з економічної точки зору інтегрована система забезпечує понад удвічі більшу ефективність використання земельної ділянки, ніж традиційне однокомпонентне землекористування.

Порівняльний аналіз показує, що при зменшенні врожайності на 0,81 т ($\approx 35\%$) біофізичний показник LER знижується до 0,92, що відображає певну втрату продуктивності у натуральному вираженні. Однак економічна оцінка демонструє $LER = 1,99$, тобто майже дворазове зростання ефективності використання землі завдяки генерації електроенергії.

Таким чином, навіть за умов зниження врожайності, агровольтаїчна система є економічно вигіднішою порівняно з традиційним землекористуванням. Це підтверджує доцільність впровадження таких технологій, особливо в регіонах із високим рівнем інсоляції та сприятливими тарифами на відновлювану енергетику.

Для подальшої оптимізації роботи системи доцільно провести моделювання різних рівнів затінення, висоти встановлення панелей та вибору культур, щоб досягти $LER \geq 1$ навіть у фізичному аспекті. Це дозволить забезпечити як екологічну, так і економічну стійкість агровольтаїчних систем у сільськогосподарському виробництві.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Основні положення охорони праці

Охорона праці – це цілісна система правових, соціально-економічних, технічних, санітарно-гігієнічних та організаційних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці, збереження життя, здоров'я та працездатності працівників у процесі трудової діяльності. Основним завданням системи охорони праці є створення таких умов виробництва, за яких ризики травматизму, професійних захворювань і нещасних випадків зводяться до мінімуму.

Адміністрація підприємства зобов'язана забезпечити постійний контроль за дотриманням вимог безпеки працівниками, що виконують роботи в електроустановках, а також за використанням ними засобів індивідуального захисту, спецодягу та запобіжних пристроїв. Посадові особи, які не забезпечують виконання вимог з охорони праці, несуть адміністративну або кримінальну відповідальність відповідно до чинного законодавства України.

Техніка безпеки в електроустановках – це сукупність організаційних і технічних заходів, спрямованих на захист людини від ураження електричним струмом, впливу електричної дуги, електромагнітного поля та статичної електрики. Особливістю електроенергії є її невидимість і відсутність попереджувальних ознак, що потребує особливої уваги до дотримання правил безпеки.

Основними причинами ураження електричним струмом є:

- дотик до неізовльованих струмопровідних частин електроустановок, оголених проводів або контактів електричних машин;
- дотик до металевих частин обладнання, які внаслідок пошкодження ізоляції опинилися під напругою.

Для запобігання електротравматизму застосовують комплекс спеціальних технічних і організаційних заходів. Основні електрозахисні засоби — це ізолюючі пристрої, здатні витримувати робочу напругу та забезпечувати безпечну роботу з

елементами, що перебувають під напругою. До них належать ізолюючі штанги, покажчики напруги, діелектричні рукавички, килимки, боти, інструменти з ізольованими ручками.

Додаткові засоби захисту, що не забезпечують повної ізоляції, застосовуються для запобігання дії напруги дотику або крокової напруги. До таких належать діелектричні рукавички, боти, підставки, переносні заземлення тощо. В електроустановках низької напруги всі струмопровідні частини повинні бути надійно ізольовані або закриті кожухами, що виключають випадковий контакт. Ремонтні та монтажні роботи дозволяється проводити лише після повного знеструмлення обладнання та перевірки відсутності напруги.

На місцях проведення робіт обов'язково встановлюються попереджувальні знаки та плакати безпеки. Персонал, що обслуговує електроустановки, повинен мати практичні навички надання першої медичної допомоги постраждалим при ураженні електричним струмом, а також знати алгоритм дій у надзвичайних ситуаціях. Перевірка знань з техніки безпеки проводиться періодично, а не рідше одного разу на рік персонал проходить навчання з використанням сучасних тренажерів для відпрацювання навичок реанімаційної допомоги.

Електротехнічний персонал має бути забезпечений спецодягом, спецвзуттям та засобами індивідуального захисту відповідно до характеру виконуваних робіт. У разі невикористання або неправильного застосування засобів захисту працівник несе відповідальність за наслідки нещасного випадку, що може статися внаслідок порушення вимог безпеки.

Усі електрозахисні засоби та індивідуальні засоби захисту, які використовуються електромонтерами, повинні відповідати вимогам державних стандартів та проходити періодичну перевірку.

Навчання правилам техніки безпеки проводиться з усіма працівниками, які проходять первинний або повторний інструктаж. У разі виконання робіт підвищеної небезпеки відповідальному виконавцю видається наряд-допуск, у якому визначаються конкретні заходи з безпеки праці. Особи, молодші 18 років, не допускаються до виконання робіт в електроустановках.

Таким чином, система охорони праці в електроустановках є необхідною умовою забезпечення безпечної діяльності підприємства. Її ефективність залежить

від належної організації контролю, забезпечення працівників засобами захисту, систематичного навчання та дотримання вимог нормативно-правових актів.

6.2. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів на етапах життєвого циклу фотоелектричних систем

Використання та динамічний розвиток сонячної енергетики супроводжується появою нових видів професійних ризиків, пов'язаних із проектуванням, виробництвом, монтажем і утилізацією фотоелектричних систем. У процесі експлуатації та обслуговування сонячних електростанцій працівники стикаються з низкою небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що мають різну природу – механічну, електричну, хімічну, термічну, а також психофізіологічну. Відповідно до чинних нормативів з охорони праці (НПАОП 40.1-1.21-98; ДБН В.2.5-23:2010), роботи з монтажу й експлуатації фотоелектричних установок належать до категорії підвищеної небезпеки.

Сучасна фотоелектрична промисловість включає широкий спектр технологічних процесів – від видобутку та переробки сировини до утилізації відпрацьованих модулів. На кожному з етапів життєвого циклу виникають свої типові загрози для безпеки персоналу. Зокрема, наукові працівники, інженери, виробничий персонал, монтажники, водії та техніки перебувають під впливом різних факторів небезпеки, інтенсивність яких змінюється залежно від тривалості експозиції та умов праці.

Видобуток і переробка сировини

Початковий етап виробництва фотоелементів пов'язаний із видобутком та первинною обробкою сировини, серед якої переважає кварц, що використовується для отримання елементарного кремнію. Цей процес супроводжується виділенням пилу з високим вмістом діоксиду кремнію, який за тривалого вдихання може спричиняти силікоз — професійне захворювання легень.

Окрім того, у процесі переробки застосовуються та утворюються токсичні сполуки – телурид кадмію (CdTe), селенід індію-міді (CIS), селенід галію індію-міді (CIGS), арсенід галію (GaAs), які характеризуються високою леткістю й

вибухонебезпечністю. Контакт з цими речовинами може призвести до хімічних опіків, отруєнь або канцерогенних ефектів [Solar Value Chain Coalition, 2022].

Виробництво фотоелектричних модулів

На виробничих підприємствах фотоелектричної галузі основними небезпечними факторами є вплив агресивних хімічних реагентів (плавикова кислота, хлорсилани, хлористий водень), летких і легкозаймистих газів (SiH_4 , PH_3 , B_2H_6), а також висока температура технологічних процесів. У разі порушення герметичності обладнання або неефективної вентиляції можливе утворення токсичних парів.

Тривалий контакт із кадмієм та його сполуками може викликати рак легенів і хронічні ураження нирок, тому всі виробничі ділянки мають бути обладнані локальною вентиляцією, системами фільтрації та контролю викидів.

Монтаж і експлуатація фотоелектричних систем

Монтаж сонячних панелей поєднує три високоризикові типи робіт — покрівельні, теслярські та електромонтажні. Працівники зазнають впливу механічних, електричних, кліматичних та ергономічних ризиків. Найбільш поширеними причинами травматизму є:

- падіння з висоти, особливо при роботі на дахах або каркасах без огорожень;
- ураження електричним струмом унаслідок контакту з провідниками або лініями електропередачі;
- м'язово-скелетні перевантаження, спричинені ручним переміщенням важких панелей без підйомного обладнання;
- теплові та сонячні удари через тривале перебування під прямим сонячним випромінюванням.

Під час виконання монтажних робіт рекомендується застосування страхувальних систем, касок, діелектричних рукавичок, захисних окулярів, спецодягу з високими терморегуляційними властивостями та засобів колективного захисту.

Особливу небезпеку становить виникнення електричної дуги при пошкодженні фотоелемента або порушенні ізоляції, що може спричинити пожежу

або опік. Саме тому обов'язковим є відключення ліній постійного струму перед будь-якими роботами, а також перевірка на відсутність напруги.

Утилізація та закінчення життєвого циклу систем

Після завершення терміну експлуатації фотоелектричні модулі стають джерелом вторинного хімічного забруднення. У процесі демонтажу й переробки можливе вивільнення свинцю, кадмію, селену, а також бромованих антипіренів (BFRs) і полібромованих дифенілових ефірів (PBDE), що мають токсичну дію на ендокринну систему людини.

Крім хімічного ризику, характерним є механічне травмування через ручне розбирання конструкцій, розтягнення зв'язок і проколи. Для зменшення впливу цих факторів рекомендується автоматизація процесів утилізації, використання локальних витяжних систем і забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту.

Інші небезпеки та перспективи управління ризиками

Окрім традиційних виробничих небезпек, сучасна фотоелектрична галузь стикається з потенційними ризиками, пов'язаними із наноматеріалами та новими технологічними процесами, вплив яких на здоров'я людини та довкілля ще не до кінця вивчено. Тому науковці наголошують на необхідності екотоксикологічного моніторингу і розробки міжнародних стандартів безпеки при роботі з наноматеріалами..

Отже, на всіх етапах життєвого циклу фотоелектричних систем — від видобутку сировини до утилізації — існують різні за природою небезпечні й шкідливі фактори, які можуть негативно впливати на здоров'я працівників. Найбільш значущими є електричні, хімічні, механічні та термічні ризики. Зменшення їх впливу можливе завдяки впровадженню системного управління безпекою, дотриманню нормативних вимог, проведенню регулярного інструктажу, підвищенню культури охорони праці та застосуванню сертифікованих засобів індивідуального й колективного захисту.

6.3. Розрахунок електронебезпеки на об'єкті агровольтаїчної станції

Електробезпека є одним з найважливіших аспектів експлуатації агровольтаїчної станції потужністю 46,17 кВт постійного струму (DC) з робочою напругою DC-ланцюга до 1000 В. Особливістю об'єкта є постійна присутність людей (фермерів, робітників), сільськогосподарської техніки та, можливо, тварин безпосередньо під і біля панелей, що значно підвищує ризик ураження електричним струмом. Розрахунок виконано відповідно до чинних нормативних документів України: ПУЕ-2017, ДБН В.2.5-27-2006, ДСТУ ІЕС 60364-4-41:2017, ДСТУ ІЕС 60479-1:2017 та НАПБ А.01.001-2004.

Згідно з ПУЕ (п. 1.1.13) та ДБН В.2.5-27-2006 територія агровольтаїчної станції відноситься до відкритих електроустановок (зовнішнє встановлення).

За умовами навколишнього середовища та можливістю одночасного дотику до заземлених металевих конструкцій (опори панелей, техніка) і частин, що можуть опинитися під напругою, об'єкт класифікується як приміщення з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом (наявність провідного пилу, вологості від зрошення, сирієї землі, металевих конструкцій).

Розрахунок небезпечного струму через тіло людини

Найнебезпечніший сценарій – прямий дотик до плюсового та мінусового полюсів одного стринга (робоча напруга DC = 800–1000 В).

Опір тіла людини (ДСТУ ІЕС 60479-1:2017):

- суха шкіра – $R_t = 2000 \text{ Ом}$;
- волога шкіра (піт, дощ, зрошення) – $R_t = 1000 \text{ Ом}$.

Додатковий опір взуття та ґрунту у найгіршому випадку (мокре взуття + вологий ґрунт) приймаємо $R_{\text{дод}} = 1000 \text{ Ом}$.

Загальний опір ланцюга:

$$R_{\text{заг}} = R_t + R_{\text{дод}} = 1000 + 1000 = 2000 \text{ Ом}. \quad (6.1.)$$

Струм через тіло людини:

$$I_{\text{ч}} = U / R_{\text{заг}} = 1000 \text{ В} / 2000 \text{ Ом} = 0,5 \text{ А} = 500 \text{ мА}. \quad (6.2.)$$

Отже, струм 500 мА належить до зони 5 і є смертельно небезпечним. (табл. 6.1)

Таблиця 6.1.

Наслідки дії постійного струму на людину (за ДСТУ ІЕС 60479-1)

Зона	Струм, мА	Фізіологічний ефект
1	0–2	Зазвичай без відчуттів
2	2–30	М'язові скорочення, больові відчуття
3	30–100	Порушення серцевого ритму, можлива фібриляція
4	>100–500	Висока ймовірність фібриляції серця, важкі опіки
5	>500	Практично 100 % летальний результат навіть при короткочасному впливі

До заходів захисту належать захист від прямого та непрямого дотику.

Захист при прямому дотику (ДСТУ ІЕС 60364-4-41, клас II):

- фотомодулі мають подвійну або посилену ізоляцію (клас захисту II);
- всі з'єднання виконані в герметичних розподільних коробках IP67/IP68;
- кабелі DC – подвійна ізоляція, прокладені в захисній гофрі або металорукаві.

Захист при непрямому дотику:

- повне заземлення всіх металевих частин (опори, рами, корпуси інверторів);
- встановлено ПЗВ (пристрої захисного відключення) на АС-стороні ($I_{\Delta n} = 30$ мА, час спрацьовування $\leq 0,1$ с) та спеціальні DC-ПЗВ на стороні постійного струму (обов'язково для систем >120 В);
- автоматичні вимикачі з електромагнітним та тепловим розчіплювачем.

Розрахунок контуру заземлення

Тип ґрунту – малогумусний чорнозем, питомий опір $\rho = 100$ Ом·м (середнє значення для регіону).

Необхідний опір заземлення для систем до 1 кВ з ізолюваною нейтраллю – $R_{\text{ззз}} \leq 4$ Ом (ПУЕ п.1.7.101).

Використано 12 вертикальних заземлювачів (кутник $50 \times 50 \times 5$ мм, довжина 3 м) + горизонтальна з'єднувальна смуга 40×4 мм.

Опір одного вертикального заземлювача (спрощена формула для стрижня):

$$R_v = \rho / (2\pi L) \times \ln(4L/a) = 38\text{--}40 \text{ Ом.} \quad (6.3.)$$

Коефіцієнт використання для сітки $\eta = 0,45\text{--}0,50$.

Опір контуру без урахування смуги:

$$R = R_{\text{в}} / (n \times \eta) = 39 / (12 \times 0,47) = 6,9 \text{ Ом.} \quad (6.4.)$$

Після з'єднання смугою та врахування сезонного коефіцієнта (1,3 для вологого ґрунту) $R_{\text{зз}} = 5,3 \text{ Ом}$.

Додано 4 додаткові стрижні, тоді $R_{\text{зз}} = 3,1 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$ – відповідає нормам.

Розрахунок часу відключення та струму короткого замикання

Найгірше K_3 – на виході інвертора (АС 230/400 В). Струм $K_{3(\text{мін})} = 2,2\text{--}2,5 \text{ кА}$ (кабель $5 \times 10 \text{ мм}^2$, довжина 150 м).

Автоматичний вимикач типу С40А + ПЗВ 63А/30 мА забезпечує час відключення $\leq 0,04 \text{ с}$ (миттєвий розчіплювач) та $\leq 0,1 \text{ с}$ при струмі 30 мА – відповідає вимогам «особливо небезпечних приміщень».

При виконанні всіх розрахункових і конструктивних заходів (подвійна ізоляція, ПЗВ 30 мА на АС та ДС, заземлення $R_{\text{зз}} = 3,1 \text{ Ом}$, клас захисту II, автоматичне відключення $\leq 0,1 \text{ с}$) ймовірність смертельного ураження електричним струмом знижується до прийнятного рівня ($< 10^{-6}$ на рік) і повністю відповідає вимогам ПУЕ-2017, ДБН В.2.5-27-2006, ДСТУ ІЕС 60364-4-41:2017 та НАПБ А.01.001-2004. Об'єкт агровольтаїчної станції може бути допущений до експлуатації за умови обов'язкового щорічного вимірювання опору заземлення, ізоляції та протоколювання результатів (табл. 6.2).

Таблиця 6.2.

Додаткові організаційно-технічні заходи електробезпеки в умовах
агровольтаїки

Захід	Виконання на об'єкті	Нормативна база
Попереджувальні написи та знаки безпеки	Встановлено знаки «Стій! Напруга 1000 В», «Не піднімати техніку під панелі»	НАПБ А.01.001-2004
Огородження небезпечних зон	По периметру станції – сітка 1,8 м + попереджувальна стрічка	ПУЕ п.4.2.137
Захист кабелів від механічних пошкоджень та тварин	Подвійна ізоляція + захисна гофра/труба	ДСТУ ІЕС 60364-5-52
Блокування доступу техніки під панелі під час роботи станції	Висота нижнього краю 0,8 м + інструктаж	Внутрішні правила експлуатації
Щорічний контроль опору ізоляції та заземлення	Протокол вимірювань	ПУЕ п.1.8.37

6.4. Заходи техніки безпеки при монтажі сонячних панелей

Монтаж і експлуатація сонячних фотоелектричних установок відносяться до робіт підвищеної небезпеки, оскільки поєднують вплив комплексу шкідливих і небезпечних виробничих факторів. Специфіка таких робіт полягає у взаємодії електротехнічних, монтажних-будівельних і висотних операцій, що створює низку потенційних ризиків для здоров'я та життя персоналу.

У процесі монтажу сонячних панелей на дахах, опорах або наземних конструкціях працівники зазнають дії механічних, електричних, кліматичних, фізичних, хімічних та психофізіологічних факторів. Комплексна оцінка цих ризиків є необхідною умовою формування ефективної системи охорони праці.

Механічні небезпечні фактори

До найпоширеніших механічних ризиків під час монтажу сонячних панелей належать:

- можливість падіння працівників з висоти;
- падіння інструментів, деталей та елементів конструкцій;
- травмування при переміщенні або кріпленні металевих каркасів;
- порізи, удари, защемлення під час монтажу фотомодулів.

Більшість робіт проводиться на дахах або підвищених поверхнях, тому необхідне обов'язкове використання страхувальних поясів, запобіжних тросів, касок, тимчасових огорожень і сигнальних стрічок. Падіння з висоти навіть 1–1,5 метра може спричинити тяжкі травми, тому дотримання правил безпечного виконання висотних робіт є обов'язковим.

Окрему небезпеку становить обвал або перекидання конструкцій під дією вітру, а також руйнування несучих елементів при неправильному кріпленні.

Електричні фактори

Електричний струм є основним небезпечним фактором під час монтажу та експлуатації фотоелектричних систем. Навіть у процесі складання окремих ланцюгів панелей утворюється напруга, що може досягати 30–1000 В залежно від конфігурації системи.

Найбільш небезпечні ситуації виникають у разі дотику до оголених провідників, пошкодження ізоляції, короткого замикання або відсутності заземлення. Для запобігання електротравмам усі роботи повинні проводитися після повного знеструмлення обладнання та перевірки відсутності напруги.

Працівники мають використовувати діелектричні рукавички, взуття, килимки, інструмент із ізольованими ручками. Особливу увагу необхідно приділяти правильності монтажу ланцюгів постійного струму, оскільки пошкодження модуля або контролера може спричинити утворення електричної дуги, перегрів елементів і навіть пожежу.

Кліматичні та метеорологічні фактори

Роботи з монтажу сонячних панелей переважно проводяться на відкритих майданчиках, що зумовлює дію погодних умов — високої або низької температури, вітру, опадів, сонячного випромінювання. Умовах спеки підвищується ризик теплових ударів, зневоднення, опіків від нагрітих поверхонь і відбитого сонячного випромінювання. Взимку небезпечними є переохолодження, обмороження, слизькі поверхні та снігові замети.

Для зниження впливу цих факторів необхідно забезпечити регламентовані перерви, тіньові зони, доступ до питної води, відповідний спецодяг і взуття. Роботи слід припиняти під час грози, сильного вітру або опадів, що можуть створити небезпеку падіння чи ураження блискавкою.

Фізичні фактори

Під час монтажу застосовуються електроінструменти, що створюють підвищений рівень шуму, вібрації та локальне теплове навантаження.

Також працівники зазнають дії ультрафіолетового випромінювання і відблисків від поверхні панелей, що може викликати подразнення очей, зниження зору або головний біль.

Для зниження впливу фізичних факторів необхідно застосовувати захисні окуляри з УФ-фільтрами, навушники, антивібраційні рукавички, а також забезпечити раціональний режим праці й відпочинку.

Хімічні та санітарно-гігієнічні фактори

Деякі компоненти фотоелектричних модулів і акумуляторних систем містять токсичні речовини – свинець, кадмій, селен, електроліти на основі сірчаної кислоти.

У разі порушення герметичності або недотримання правил поводження можливе виникнення хімічних опіків, отруєнь або подразнення слизових оболонок.

Для запобігання цьому необхідно використовувати кислотостійкі рукавички, фартухи, захисні окуляри, забезпечити вентиляцію робочої зони та контроль за чистотою повітря. Під час механічної обробки металевих елементів утворюється пил, який також негативно впливає на органи дихання – тому рекомендовано застосовувати респіратори або маски.

Психофізіологічні фактори

Монтаж сонячних електростанцій пов'язаний із тривалими фізичними навантаженнями, роботою у незручних позах, необхідністю високої концентрації уваги.

Тривале перебування на висоті або в умовах спеки викликає втому, стрес, зниження координації рухів, що підвищує ризик нещасних випадків.

Раціональна організація праці, чергування робочих і відпочинкових періодів, використання механізованих підйомників та допоміжних пристроїв суттєво знижують рівень психофізіологічного навантаження.

Монтаж сонячних панелей супроводжується дією комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які потребують системного управління ризиками. Дотримання вимог нормативно-технічної документації, проведення інструктажів, контроль технічного стану обладнання, застосування сертифікованих засобів індивідуального захисту та впровадження сучасних технологій монтажу забезпечують мінімізацію ризиків травматизму.

Для підвищення рівня безпеки доцільно впроваджувати автоматизовані системи моніторингу стану працівників і обладнання, удосконалювати технологічні процеси, підвищувати кваліфікацію персоналу та формувати культуру безпечної поведінки у виробничому колективі.

ВИСНОВКИ

Відповідно до мети та поставлених завдань кваліфікаційної роботи, були отримані наступні висновки теоретичного та практичного характеру:

1. Агровольтаїка є перспективною формою інтегрованого землекористування, що забезпечує одночасне виробництво електроенергії та сільськогосподарської продукції, оптимізує використання земельних ресурсів і знижує вплив кліматичних ризиків. Аналіз світових тенденцій показав швидке зростання цієї технології та її значний потенціал для посушливих регіонів.

2. Становлення агровольтаїки в Україні перебуває на початковій стадії, однак розвиток галузі активно стимулюють енергетична нестабільність, кліматичні зміни та аграрний потенціал країни. Успішні пілотні проекти й діяльність Асоціації агровольтаїки України підтверджують доцільність інтеграції технології у національну аграрну політику та необхідність розроблення відповідних нормативних стандартів.

3. Вплив агровольтаїчної системи на томати (сорт П'єтра Росса F1) в умовах південного степу демонструє двокомпонентний ефект: пом'якшення теплового та водного стресу, але водночас – обмеження фотосинтетично активної радіації. Внаслідок цього врожайність під панелями знижується на 28–58 %, тоді як якісні характеристики плодів частково покращуються (твердість, кислотність).

4. Комплексне моделювання в APSIM v2023 показало, що агровольтаїчні конструкції формують три різні екотопи (тінь, півтінь, повне сонце), що значно підвищує структурну різноманітність агроecosистеми. Індекс Шеннона на ділянках під панелями та в міжряддях на 39 % вищий, ніж на відкритому контролі. Поява нових видів, характерних для лучно-степових угруповань, свідчить про зростання екологічної стійкості та біотопічної мозаїчності.

5. Моделювання динаміки комах-запилювачів показало 62 % приріст активності у зоні дії AVS завдяки стабільнішому мікроклімату та збільшенню квіткових ресурсів. Це підсилює екосистемні функції агроландшафту, особливо запилення культур, що є критично важливим для урожайності.

6. Агровольтаїка позитивно впливає на стан ґрунтів: під панелями зафіксовано підвищення вологості на 48 %, зниження середньодобової температури на 2,3–3,1 °С, збільшення гумусового горизонту (+0,14 %) та підвищення активності ґрунтової мікробіоти (R_s +27 %). Інтегральний індекс SESI засвідчує покращення екологічного стану ґрунтів у середньому на 54 % у порівнянні з традиційним землекористуванням.

7. Енергетична частина системи підтвердила високу продуктивність: при потужності 46,17 кВт було змодельовано сезонну генерацію 27–28,5 МВт·год, що забезпечує повну компенсацію аграрних втрат. Економічний показник, такий як коефіцієнт еквівалентності землі (LER) становить 1,99, що майже вдвічі підвищує ефективність використання землі порівняно з роздільним землекористуванням.

8. Усі результати дослідження свідчать, що агровольтаїчні системи можуть стати ключовим інструментом підвищення кліматичної стійкості аграрного виробництва в південних регіонах України. Вони не лише генерують екологічно чисту енергію, але й покращують стан ґрунтів, збагачують біорізноманіття та створюють умови для сталого розвитку територій. Подальше масштабування можливе за умови нормативної підтримки та оптимізації рівня затінення (≤ 30 –35 %) з використанням напівпрозорих панелей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Асоціація агровольтаїки України. URL: <https://agrivoltaic.org.ua/>.
2. Верховна Рада України. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» від 20.02.2003 № 555-IV (зі змінами від 2023 р.). Київ: Відомості Верховної Ради України, 2003. 20 с.
3. Верховна Рада України. Зміни до Земельного кодексу України від 2024 р. Київ: Відомості Верховної Ради України, 2024. 15 с.
4. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Керівництво щодо Фонду декарбонізації. Київ, 2025. 40 с.
5. Державне агентство з енергоефективності. *Аналіз «зеленого» тарифу*. Київ, 2025. 25 с.
6. Європейська комісія. Agrivoltaic Systems for Energy and Food Production. Brussels, 2023.
7. Концепція «Зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів. URL: <https://mepr.gov.ua/news/34424.html>
8. Літвак О.А. Зелена енергетика як ключовий елемент низьковуглецевого розвитку: світові тенденції і перспективи для України. *Сучасна траєкторія розвитку науково-технічного прогресу в Україні та світі*: колективна монографія. Херсон: Видавничий дім «Гельветика», 2021. С. 80–112.
9. Літвак О.А., Павлишко С.В. Розвиток сонячної енергетики в контексті Європейського Зеленого курсу. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції, 20 вересня – 21 вересня 2023 р. Миколаїв : НУК імені адмірала Макарова, 2023. С. 272–274.
10. Літвак С.М., Іванченко К.В. Агровольтаїка як інноваційний інструмент енергозбереження та зменшення екологічного навантаження в агросекторі. *Проблеми екології та енергозбереження* : матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Миколаїв 23-24 жовтня 2025 р. Миколаїв: НУК, 2025. С. 111-116.
11. Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA). Agrivoltaics: Smart Land Use for Energy and Food Security. Abu Dhabi, 2023.

- 12.Міністерство аграрної політики та продовольства України. Стратегія Європейського зеленого курсу для України. Київ, 2024. 60 с.
- 13.Міністерство енергетики України. Проект Закону про агровольтаїку. Київ, 2025. 25 с.
- 14.Міністерство енергетики України. Річний звіт про розвиток відновлюваної енергетики. Київ, 2025. 150 с.
- 15.Міністерство освіти і науки України. Оголошення конференції: Стратегія розвитку агровольтаїки. Київ, 2025. 10 с.
- 16.Міністерство фінансів України. *Оподаткування діяльності з подвійним доходом*. Київ, 2024. 20 с.
- 17.НААН України. *Соціологічне дослідження впровадження агровольтаїки*. Київ, 2024. 40 с.
- 18.Національна академія аграрних наук України. *Дослідження агровольтаїки на орних землях*. Київ, 2024. 80 с.
- 19.Національний енергетичний і кліматичний план України. *Цілі розвитку відновлюваної енергетики до 2030 року*. Київ, 2030. 100 с.
- 20.Організація Об'єднаних Націй. *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York, 2020. 56 с.
- 21.Охорона праці і промислова безпека в будівництві. ДБН А.3.2-2-2009. Мінрегіонбуд України. Київ. 2012. 122 с.
- 22.Правила улаштування електроустановок. Наказ Міненерговугілля України, 21.07.2017. Київ. 617 с.
- 23.Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію, вироблену генеруючими установками приватних домогосподарств. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 30.06.2023 р. № 1216. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1216874-23#Text>.
- 24.Продовольча та сільськогосподарська організація ООН (FAO). *Solar technologies for agriculture and rural development*. Rome, 2021. 21 с.
- 25.Прокопенко К. О. (По)воєнні перспективи вирощування нішевих культур в аграрному секторі [Електронний ресурс] / К. О. Прокопенко, Л. О. Удова //

- Економіка і прогнозування. - 2023. - № 2. - С. 118-133. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/econprog_2023_2_8
- 26.Серіков Я.О. Основи охорони праці: навчальний посібник для студентів вищих закладів освіти. Харків, ХНАМГ, 2007. 227с.
- 27.Спрощений розрахунок сонячних панелей. URL: <https://solarsoul.net/uk/rozrachunok-sonyachnix-panelej>
- 28.APSIM. URL: <https://www.apsim.info/support/apsim-training-manuals/introduction-to-apsim-ui/>
- 29.Adeh E. H., Good S. P., Calaf M. Solar panels reduce land surface temperature and increase agricultural yields in drylands. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. P. 44.
- 30.Amaducci S., Yin X., Colauzzi M. The challenge of combining agricultural productivity and solar energy generation. *Applied Energy*. 2018. Vol. 219. P. 339–351.
- 31.Barron-Gafford G. A., Pavao-Zuckerman M. A., Minor R. L. et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*. 2019. Vol. 2, No. 9. P. 848–855.
- 32.Barron-Gafford G. *The Potential of Agrivoltaics for the Future of Solar Energy*. *Nature Sustainability*, 2019, Vol. 2, P. 848–855.
- 33.Chinese National Energy Administration. *Agrivoltaics Capacity Report*. Beijing, 2024. 40 p.
- 34.Colauzzi M., Genovese A. Agrivoltaics in Europe: State of the art and perspectives. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 172. P. 205–219.
- 35.Czech Ministry of Agriculture. *Amendments for Orchards*. Prague, 2025. 25 p.
- 36.Dinesh H., Pearce J. M. The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 54. P. 299–308.
- 37.Dupraz C. *Agroforestry and Agrivoltaics: Synergies for Sustainable Land Use*. *Agroforestry Systems*, 2021, Vol. 95, P. 123–145.
- 38.Dupraz C., Marrou H., Talbot G. et al. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*. 2011. Vol. 36, No. 10. P. 2725–2732.
- 39.Dutko A. Feasibility study for project of agrophotovoltaic system based on the existing solar power plant [Електронний ресурс] / A. Dutko, Ł. Putz, A. Yatseiko

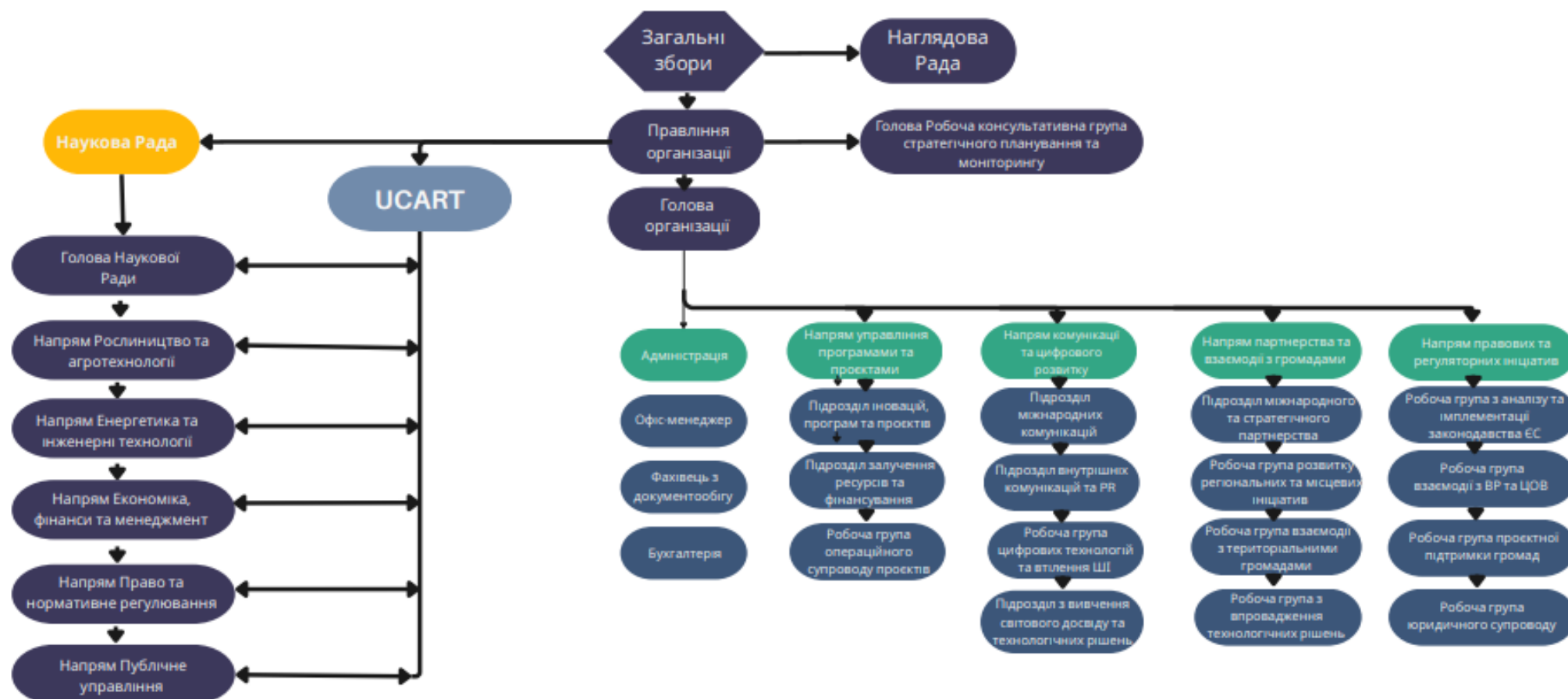
- // Energy engineering and control systems. - 2022. - Vol. 8, Num. 2. - С. 73-80. –
Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eecs_2022_8_2_4
- 40.EBRD. *Investment Needs for Renewables in Ukraine*. London, 2025. 60 p.
- 41.Energy Partnership Ukraine. *Ukraine's 2025 Solar Market Outlook* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://energypartnership-ukraine.org/milestones/default-title/>
- 42.Energy Partnership Ukraine. *Огляд ринку сонячної енергетики в Україні* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://energypartnership-ukraine.org/milestones/default-title/>
- 43.European Commission. *ESG Investment Policy Guidelines*. Brussels, 2024. 120 p.
- 44.Frantál B., Frolova M., Liñán-Chacón J. Conceptualizing the patterns of land use conflicts in wind energy development: Towards a typology and implications for practice //Energy Research & Social Science. – 2023. – Т. 95. – p. 102-107
- 45.Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. *Agri-PV – Combining agriculture and photovoltaics sustainably*. Freiburg, 2022.
- 46.Fraunhofer ISE. *APV-RESOLA Project Findings* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ise.fraunhofer.de>
- 47.French Government. *Act APER on Renewable Energy Acceleration*. Paris, 2023. 30 p.
- 48.Goetzberger A., Zastrow A. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy*. 1982. Vol. 1, No. 1. P. 55–69.
- 49.Golub H., Tsyvenkova N., Rogovskii I. et al. Determining the influence of design features in agrivoltaic systems on tracking efficiency // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 3(8). P. 14–22.
- 50.Gorjian S. et al. Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Т. 158. – p. 112-126.
- 51.Hassanpour Adeg E., Selker J. S., Higgins C. W. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE*. 2018. Vol. 13, No. 11. P. 256.
- 52.ILO. *Job Creation in Renewables Sector in Ukraine*. Geneva, 2025. – 70 p.

- 53.IRENA. *End-of-Life Management for Solar Photovoltaic Panels*. Abu Dhabi, 2024. 80 p.
- 54.IRENA. *Global Renewables Outlook: Ukraine Chapter*. Abu Dhabi, 2025. 80 p.
- 55.IRENA. *Renewable Energy Market Analysis: Africa and its Regions*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021. 188 p.
- 56.Italian Ministry of Ecological Transition. *Agrivoltaics Funding Plan*. Rome, 2024. 35 p.
- 57.LinkedIn. *Agrovoltaics in the World and in Ukraine: Are We Ready for Change?* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.linkedin.com/pulse/agrovoltaics-world-ukraine-we-ready-change-sunsayenergy-p5z kf>
- 58.Litvak O., Litvak S. Some Aspects of Reducing Greenhouse Gas Emissions by Using Biofuels. *Journal of Ecological Engineering*, 2020. Vol. 21, iss. 8. P.198–206.
- 59.Marrou H., Dufour L., Wery J. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013. Vol. 177. P. 117–132.
- 60.Moins F. A. O. P. P. A. Guide A L'intention Des Décideurs Sur L'intensification Durable De L'agriculture Paysanne //FAO: Rome, Italy. – 2011. – 123 p.
- 61.Mongird K., Viswanathan V., Balducci P. et al. Environmental and economic impacts of agrivoltaic systems. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 190. P. 602–614.
- 62.Pascaris A. S., Schelly C., Pearce J. M. Integrating solar energy with agriculture: A socio-technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 132. P. 11-23.
- 63.PV Knowhow. *Ukraine Solar Energy: Impressive Growth Proven by 2025*. URL: <https://www.pvknowhow.com/news/ukraine-solar-energy-impressive-growth-proven-by-2025/>
- 64.Rubryka. *How Dual Use of Land Can Be a Game-Changer for Ukrainian Farmers*. URL: <https://rubryka.com/en/article/shho-take-agrovoltayika/>
- 65.Sass J., Hahn A. Solar Powered Irrigation Systems (SPIS) Technology, Economy, Impacts //Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH: Bonn, Germany. – 2020. – 214p.
- 66.SIG Energy. *Інтегровані рішення для ферм Одеської області*. Одеса, 2025. 30 с.

- 67.SolarPower Europe. *Bifacial Panels in Agrivoltaics*. Brussels, 2024. 40 p.
- 68.Tesla Energo. *Звіт про проєкт сонячної електростанції «Ганська»*. Київ, 2025. 45 с.
- 69.Trommsdorff M. *Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition*. Freiburg: Fraunhofer ISE Report, 2022. 50 p.
- 70.UNDP. *Energy Resilience in Rural Areas*. New York, 2024. 50 p.
- 71.Unis N. La population Mondiale Atteindra 8 Milliards le 15 Novembre 2022 //Nations Unis: New York, NY, USA. – 2022. – 63 p.
- 72.We Build Ukraine Fund. *Виклики аграрного сектору у 2025 році* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.webuildukrainefund.org/our-analytics/challenges-of-the-agribusiness-sector-in-2025-and-opportunities-for-adaptation-to-new-realities/>
- 73.We Build Ukraine Fund. *Виклики агробізнесу*. Київ, 2025. 30 с.
74. Weselek A., Ehmann A., Zikeli S. et al. AgriPV – Combining photovoltaic power generation with food production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 140. P. 110.

ДОДАТКИ

Структура Асоціації Агровольтаїки України



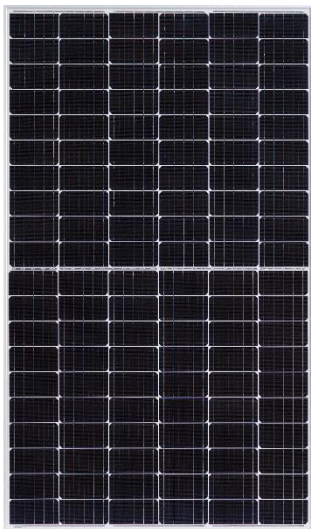
Вплив фотоелектричних панелей на різні культури в різних місцевостях

Врожаї	Область дослідження	Висота та/або інтервал або коефіцієнт затінення	Вплив на культуру
Тверда пшениця [24]	Монпельє, Франція	Висота 4 м Відстань між панелями 1,64 м (відстань між нижньою стороною двох послідовних панелей) Нахил 25°	- Зменшення сухої речовини на 11–29% - Зниження врожайності на 8–11%
Салат і огірок [50]	Монпельє, Франція	Висота 4 м, нахил 25°	- Зменшення евапотранспірації на 62% та 70% для салату та на 73%–81% для огірка - Площа посівів була значно вищою в затінених варіантах (150% між 124 та 144 днями)
Салат-латук [49]	Монпельє, Франція	Висота 4 м. Дві відстані між рядами: 1,6 м при повній щільності та 3,2 м при половинній щільності. Нахил 25°.	- Вісь посівів під фотоелектричними панелями становила 7,4 см з 2,0 г сухої речовини на вісь порівняно з 6,6 см та 2,5 г на вісь на повному сонці. - Значно зменшена кількість листя в тіні - Збільшена площа листя
Салат-латук [38]	Канзас, штат США	Висота 4 м. Дві відстані між рядами: 6,4 м при половинній щільності та 3,2 м при повній щільності.	- Зниження врожайності на 42% для інтервалу 3,2 м та на 19% для інтервалу 6,4 м влітку - Відсутність впливу на врожайність при відстанні 6,4 м навесні, але зниження на 21% при відстанні 3,2 м
Чилі та помідор [54]	Тусон, США	Висота 3,3 м над поверхнею ґрунту в найнижчій точці Відстань 1 м Нахил 32°	- Для <i>Capsicum annuum</i> var. <i>glabriusculum</i> врожайність під панелями втричі вища. - Для <i>C. annuum</i> var. <i>рік</i>, впливу немає - Для <i>S. lycopersicum</i> var. <i>cerasiforme</i> виробництво під панелями вдвічі вище.

Продовження Додаток. Б

Кукурудза[55]	Префектура Тіба, Японія	Висота 2,7 м. Два міжряддя: 0,71 м для високої щільності та 1,67 м для низької щільності. Нахил 30°.	Врожайність 3,54 кг/м², 3,35 кг/м² та 3,23 кг/м² на відстані 1,67 м на повному сонці та на відстані 0,71 м відповідно
Виноград [56]	Онджін-гун, Республіка Корея	Висота 2 м, нахил 15°, рівень затінення 30% від загальної площі даху	Період проростання, кількість квіток та ріст винограду однакові у всіх варіантах обробки.
Базилік та шпинат [28]	Італія	-	Зменшення врожайності товарної біомаси на 15% та 26% для базиліка та шпинату відповідно
Кунжут, маш, квасоля, кукурудза та соя [48]	Чолланам-до, Південна Корея	Висота 5,42 м. Коефіцієнт затінення 32%, 25,6% та 21,3%.	- Зниження врожайності для всіх культур, крім кукурудзи, при затіненні на 21,3% - Врожайність кукурудзи зросла на 6% і становила 21,3%, а кунжуту, сої, машу та квасолі знизилася на 7%, 13%, 21% та 26% відповідно. - При 25,6% зниження врожайності на 14% для кунжуту та на 35–44% для квасолі - При 32% зниження врожайності на 53% для кунжуту та на 30–44% для інших культур
Ріпак, цибуля, боби та кормова кукурудза в сівозміні з картоплею-динею, морква, цибуля та сушений горох у сівозміні з томатами [58]	Севілья, Іспанія	Висота 5 м, відстань між опорними конструкціями 9,5 м, нахил 27°	Зниження врожайності сільськогосподарських культур у тіні після кореляції досліджень, що вже були проведені щодо впливу тіні на площу (зниження на 10%, 7%, 17%, 6%, 20%, 23%, 15% та 5% для моркви, кукурудзи, дині, цибулі, ріпаку, картоплі, сухого гороху та помідорів відповідно)
Селера [59]	Південно- західна Німеччина	Відстань між рядами: 9,5 м (2,8 модуля ширини ряду) Висота (вільний простір у напрямку роботи/верхнього краю): 5,5 м/8 м	- Висота врожаю була на 30,6% та 14% вищою під панелями у 2018 та 2017 роках відповідно. - Вихід сухої речовини надземної біомаси був на 48% вищим, а під панелями – на 31,9% вищим.

Червоний буряк, озима пшениця, картопля та конюшина лугова [125]	Південно- західна Німеччина	Висота 5 м, відстань між елементами 6,3 м, нахил 20°	- Збільшення висоти посівів для всіх культур - Між 2017 та 2018 роками: від -19 до +3% для озимої пшениці, від -20 до +11% для картоплі та від -8 до -5% для лучної конюшини
Рис, цибуля, часник, жито, соя, квасоля, кукурудза, кормові культури [126]	Південна Корея	Висота 3,3 м, відстань між елементами 1,5 м, коефіцієнт затінення 30%	- Для рису висота стебел під панелями була на 3,8 см вищою, а врожайність знизилася на 18,7% у 2018 році та на 8,9% у 2019 році. - Врожайність сої та квасолі знизилася на 68,7% та 73,3% відповідно. - Врожайність часнику та цибулі знизилася на 18,7% та 14,6% відповідно. - Для кормових культур висота під панелями була на 7,4 м вищою, проте врожайність знизилася на 3,1 т/га.
Рис, картопля, кунжут та соя [42]	Південна Корея	Висота від 4 м до 4,5 м	- Жодного впливу на ріст, окрім кунжуту (менша довжина стебла, кількість гілок та вага 1000 насінин) - Зниження врожайності картоплі на 3%, кунжуту на 19%, сої на 18–20% та рису на 13–30%.
Соя[127]	Монтічеллі- д'Онгіна, Італія	Висота від 4 до 4,5 м. Відстань між рядами трекерів панелей 12 м. Чотири режими: затінення 27%, 16%, 9% та 18%.	- Висота врожаю 98,25 см при 27%, 90,81 см при 18%; 86,95 см при 16% та 85,04 см при 9% затіненості під панелями та 87,8 см на повному сонці - Кількість стручків зменшилася на 19,4% при 27% затінку та на 18,2% при 18% затінку порівняно з варіантами з 16% затінку або менше - Урожайність зерна зменшилася на 8%, 4,6% та 11,8% відповідно при затіненні 27%, 9% та 18% порівняно з повним сонцем, тоді як при затіненні 16% урожайність зросла на 4,4%.



Фотоелектричні модулі Viessman Vitovolt 300

Якість німецьких високотехнологічних товарів, до яких відноситься обладнання Viessmann, не викликає сумніву.

Асортимент продукції Vitovolt 300 включає монокристалічні модулі потужністю до 410 Вт.

Фотоелектричні модулі Vitovolt 300 відрізняються високими показниками продуктивності безкомпромісною якістю, а також повною гарантією на

та продукцію та потужність від компанії Viessmann. Крім того, всі модулі поставляються тільки з позитивними допусками на вихідну потужність. Це означає збільшення потужності до 5 Вт.

Особливості модулів Vitovolt 300:

- привабливий дизайн і найвищі показники продуктивності;

Модулі Vitovolt 300 відрізняються дизайном і розмірами. Деякі модулі мають чорну анодовану раму, дуже темні монокристалічні фотоелементи і чорну тедларову плівку. Результатом є унікальний дизайн для привабливої сонячної архітектури та максимальної продуктивності.

- сертифікований процес якості;

Комплексний процес забезпечення якості гарантує, що високі вимоги, які пред'являються до фотоелектричних модулів серії Vitovolt 300, завжди виконуються. Всі етапи виробництва модулів Vitovolt 300 ретельно контролюються, починаючи з комплексної комерційної та технічної кваліфікації, яка вимагається від наших постачальників. І не тільки для першої партії продукції - кожна стадія виробництва контролюється на місці і затверджується тільки в тому випадку, якщо дотримані широкі критерії специфікації Viessmann. Перевірка вхідних товарів на складі гарантує, що якість фотоелектричних модулів Vitovolt 300 зберігається навіть під час транспортування.

Технічні характеристики AVS

Опис	Viessmann Vitovolt 300 M390 WG	Viessmann Vitovolt 300 M300 RA
Панельний каркас	Звичайний	Напівпрозорий
Тип клітини	Монокристалічний	Монокристалічний
Номінальна вихідна потужність (P MPP)	390 Вт	310 Вт
Максимальна напруга живлення (V MPP)	40,8 В	32,9 В
Максимальний струм потужності (I MPP)	9,56 А	9,52 А
Напруга холостого ходу (Voc)	49,3 В	40,3 В
Струм короткого замикання (Isc)	10,03 А	10,12 А
Ефективність модуля	20,8%	18,8%

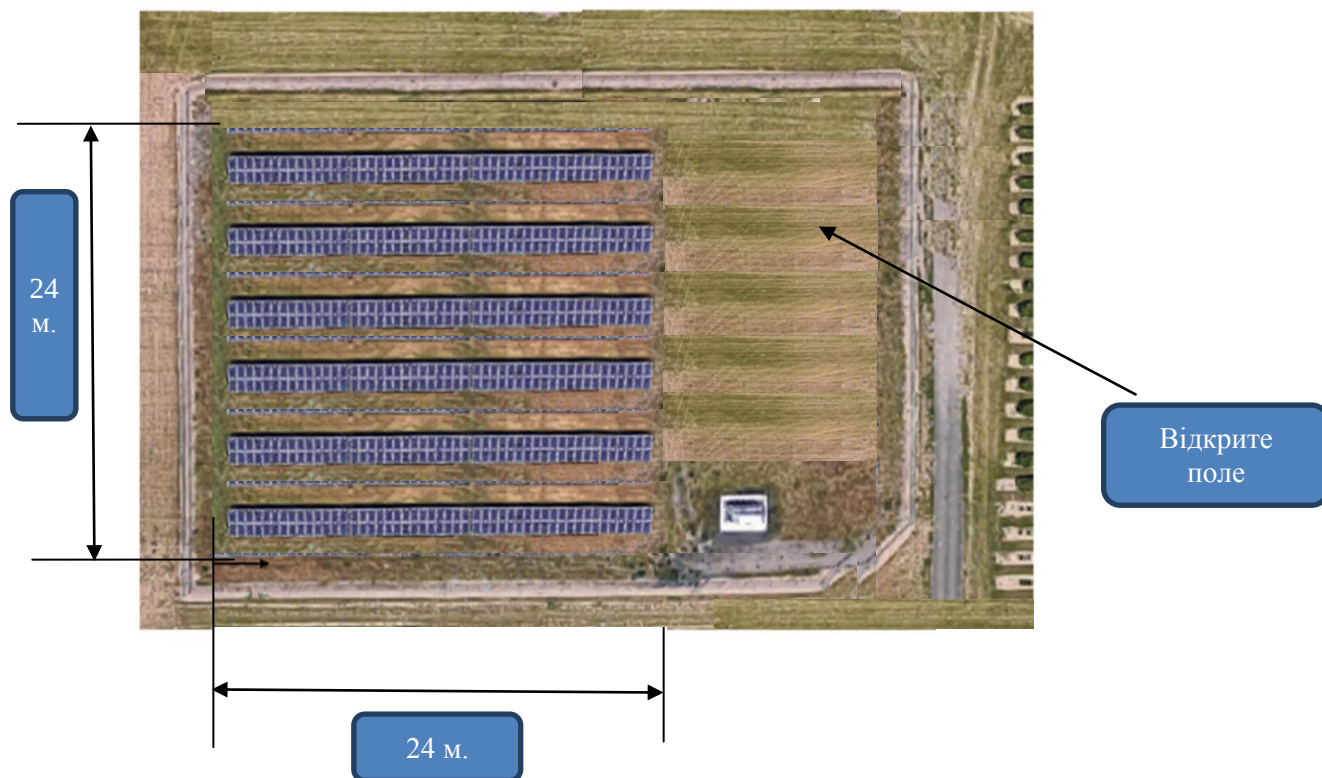


Схема екпериментального поля

Додаток Е



Пьетра Росса F1 — це середньоранній детермінантний гібрид томату від компанії Clause, який підходить для механізованого збору, цілюноплідного консервування та свіжого ринку. Його характеристики включають компактний кущ (50-60 см), однорідні плоди сливоподібної форми вагою 70-80 г, темно-червоний колір та солодкий смак (BRIX 5,5-6,0%). Гібрид вирізняється високою стійкістю до хвороб (вертицильоз, фузаріоз), хорошою лежкістю та транспортабельністю.



Характеристики:

Тип: Детермінантний гібрид томату.

Період вегетації:
Середньоранній, 110-120 днів.

Рослина: Компактна, напіврозкидиста, висотою 50-60 см, добре облиствена.

Плоди:

Форма: Сливоподібна, вирівняна.

Вага: 70-80 г.

Колір: Насичений темно-червоний.

Смак: Солодкий, з високим вмістом цукру (BRIX 5,5-6,0%).

Стійкість: Висока до вертицильозного ув'ядання, фузаріозу, бактеріальної плямистості, а також толерантність до мелойдогінозу.

Врожайність: Висока і стабільна.

Дозрівання: Одночасне, плоди добре відділяються від плодоніжки.

Вологомір ґрунту TDR 100, spectrum technologies

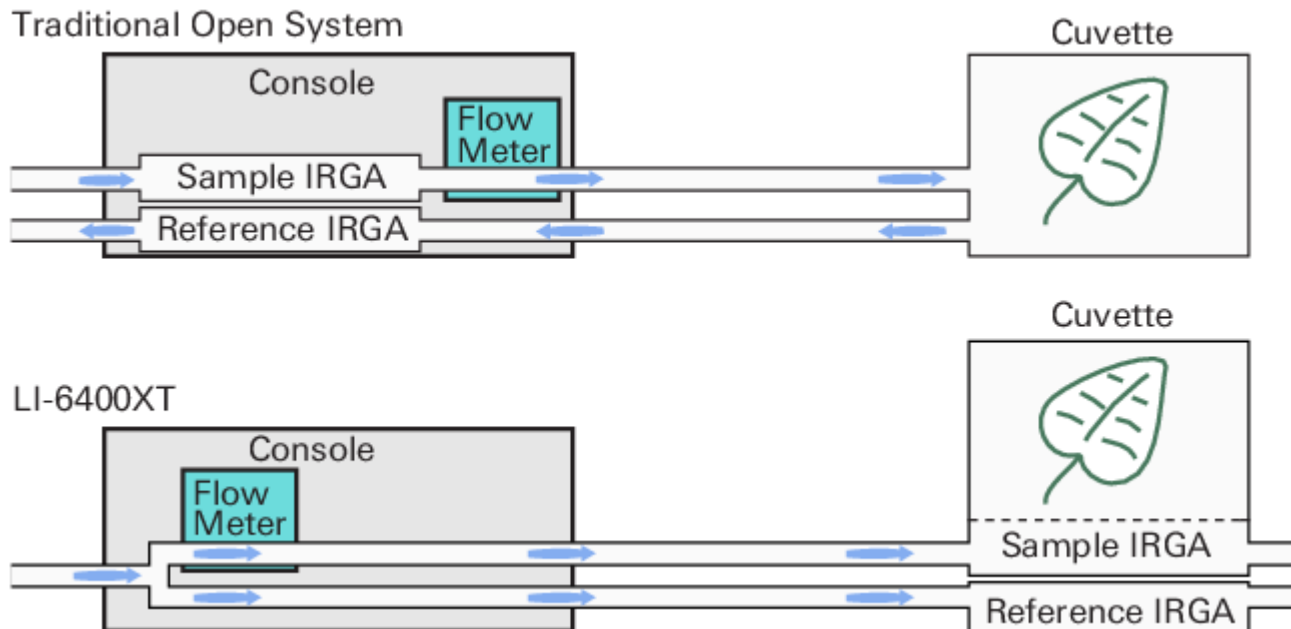


TDR 100 – це компактний вологомір ґрунту, який дозволяє отримувати показання на ходу. Це ідеальне рішення для вимірювання вологості ґрунту у контейнерах на стелажах. Щупи різної довжини дають змогу підібрати потрібну глибину виміру.

Портативна система фотосинтезу LI-6400/XT



LI-6400 — це відкрита система, а це означає, що вимірювання фотосинтезу та транспірації базуються на різниці між CO_2 та H_2O у потоці повітря, що протікає через кювету з листям.



Прилад для вимірювання кольору CR-400

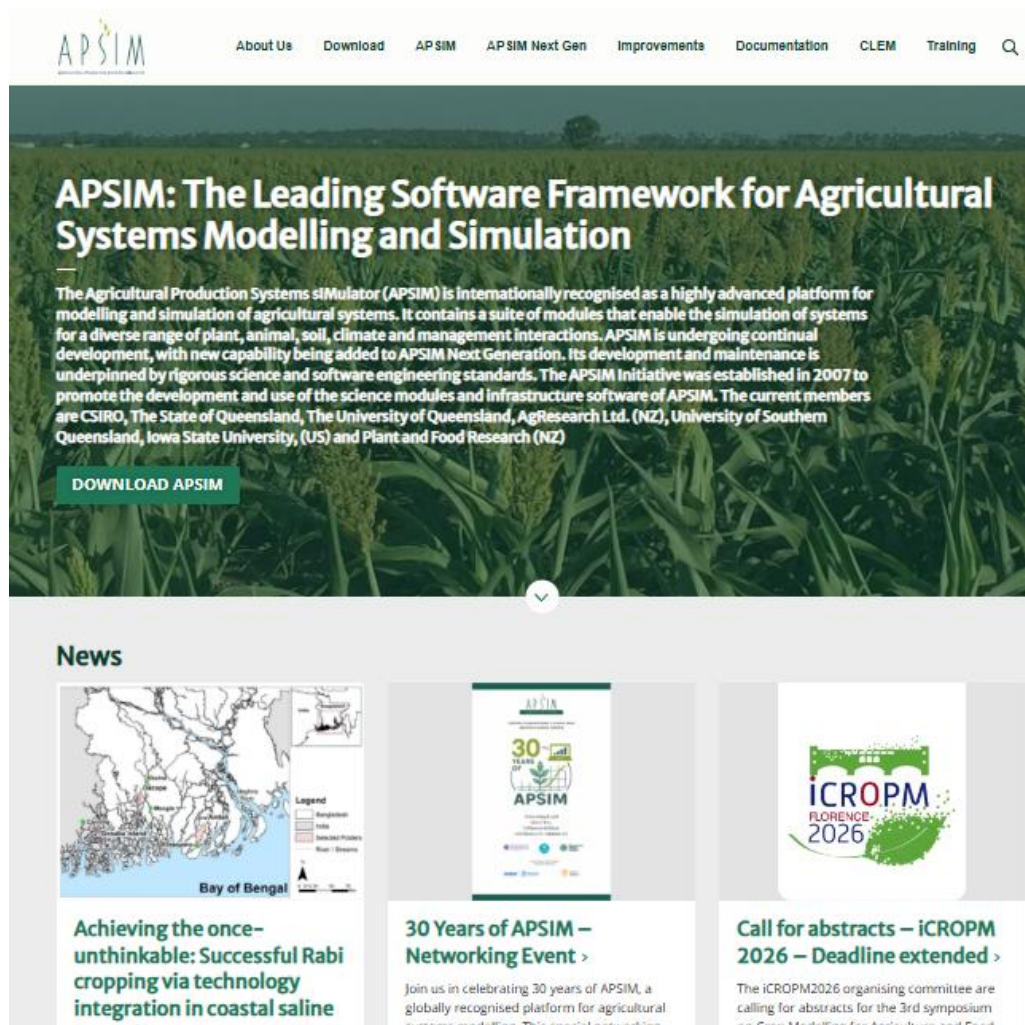


Прилад для вимірювання кольору CR-400 з вимірювальною апертурою 8 мм пропонує економічно ефективне рішення для контролю якості кольору, коли не потрібні спектральні дані. Прилад може працювати підключений до ПК, блоку обробки даних/принтера або як незалежна вимірювальна головка. Він забезпечує просте рішення для вимірювання практично для всіх твердих/порошкоподібних зразків.

Портативний колориметр з вертикальним вирівнюванням:

- 6 кремнієвих фотоелементів (XYZ)
- Геометрія d/0
- Діаметр вимірювання Ø 8 мм (CR-400)

APSIM: Провідна програмна платформа для моделювання та симуляції сільськогосподарських систем



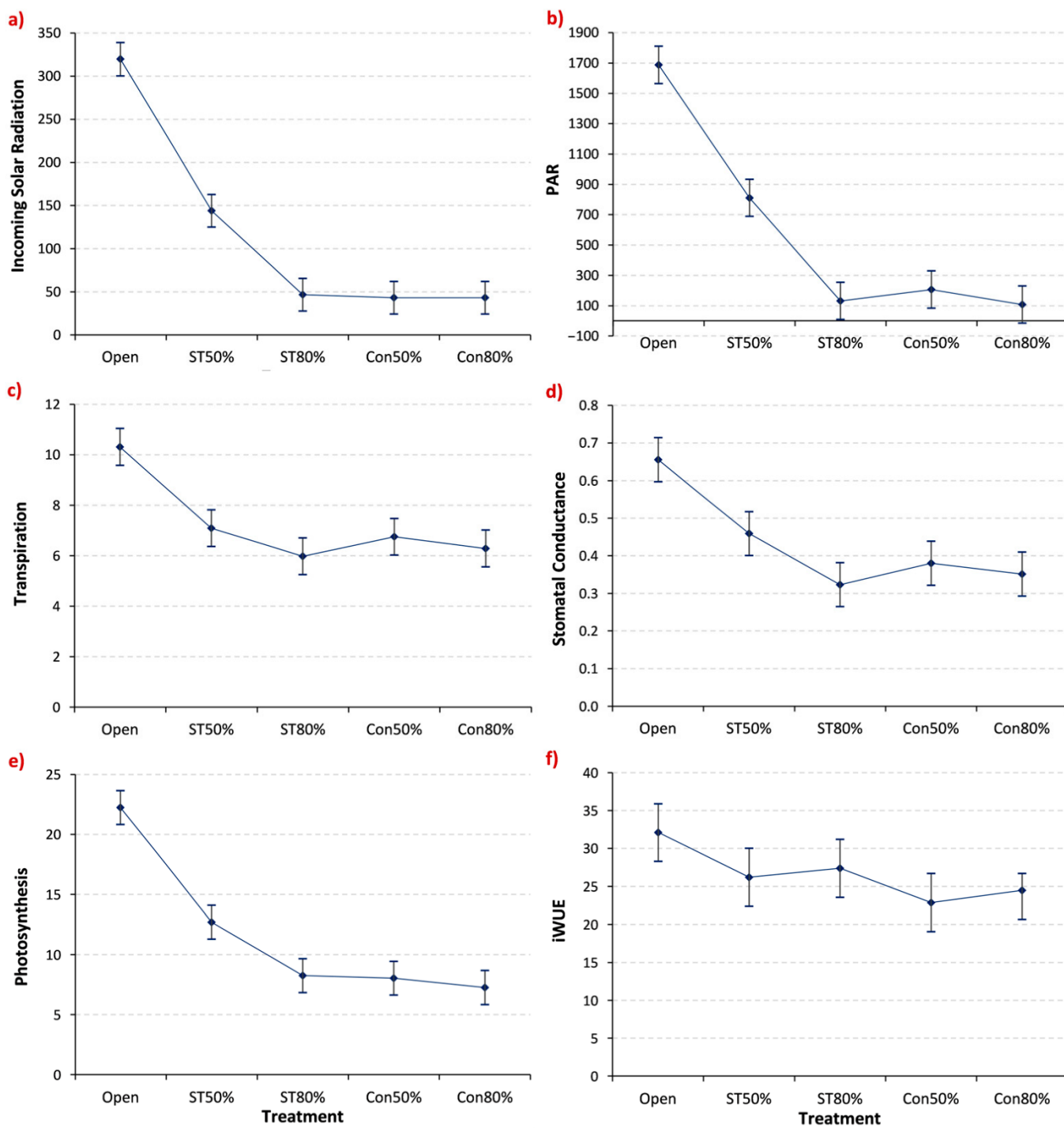
Система моделювання сільськогосподарських виробничих систем (APSIM) визнана на міжнародному рівні як високосучасна платформа для моделювання та симуляції сільськогосподарських систем. Вона містить набір модулів, що дозволяють моделювати системи для широкого спектру взаємодій рослин, тварин, ґрунту, клімату та управління. APSIM постійно розвивається, до APSIM Next Generation додаються нові можливості. Його розробка та підтримка базується на суворих наукових та програмних стандартах. Ініціатива APSIM була створена у 2007 році для сприяння розробці та використанню наукових модулів та інфраструктурного програмного забезпечення APSIM.

Додаток М

Статистичний аналіз фізіологічних параметрів

Умови вирощування	Сонячна радіація	PAR	Швидкість транспірації	Прохідна провідність	Фотосинтез	iWUE
Відкрита ділянка	319,88 ^a	1687,60 ^a	10,31 ^a	0,66 ^a	22.24 ^a	2.20 ^a
ST50%	143,90 ^b	811,00 ^b	7,09 ^b	0,46 ^b	12,70 ^b	1,56 ^b
ST80%	46,73 ^c	131,64 ^c	5,97 ^b	0,32 ^c	8,25 ^c	1,43 ^c
Con50%	43,16 ^c	206,10 ^c	6,75 ^b	0,38 ^c	8,04 ^c	1,17 ^c
Con80%	43,17 ^c	108,00 ^c	6,28 ^b	0,35 ^c	7,26 ^c	1,25 ^c

Дані представляють середнє значення 6 вибірок (n = 36). Середні значення, за якими йдуть інші літери в одному стовпці, суттєво відрізнялися (p < 0,05) за критерієм Тесту Тьюкі (тест чесної чуттєвої різниці)



Інтервальні графіки зміни обробки від (a) вхідної сонячної радіації, (b) ФАР, (c) транспірації, (d) продихової провідності, (e) фотосинтезу та (f) iWUE.

Додаток О

Якісні характеристики томату

Умови вирощування	% сухого речовини	% від загальної кількості	COL	Твердість (N)	pH	ТА (% лимонної кислоти)	TSS (°Brix)	Співвідношення TSS:TA
Ефект тіні								
Open	6,67 ± 0,44 ^{ab}	93,33 ± 0,44 ^{abc}	37,26 ± 3,75 ^a	34,54 ± 9,13 ^a	4,32 ± 0,03 ^a	0,31 ± 0,01 ^c	4,93 ± 0,15 ^a	15,85 ± 0,67 ^a
ST50%	6,13 ± 0,10 ^{abc}	93,87 ± 0,10 ^{abc}	38,97 ± 2,90 ^a	37,84 ± 12,43 ^a	4,29 ± 0,03 ^a	0,35 ± 0,01 ^{bc}	4,87 ± 0,15 ^a	14,09 ± 0,40 ^b
ST80%	5,21 ± 0,25 ^c	94,79 ± 0,25 ^a	37,07 ± 3,96 ^a	33,58 ± 14,57 ^a	4,15 ± 0,03 ^b	0,42 ± 0,01 ^a	5,10 ± 0,20 ^a	12,08 ± 0,43 ^{bc}
Con50%	7,16 ± 0,96 ^a	92,84 ± 0,96 ^c	35,89 ± 4,50 ^a	34,18 ± 10,09 ^a	4,13 ± 0,01 ^b	0,35 ± 0,01 ^b	4,93 ± 0,15 ^a	13,95 ± 0,78 ^b
Con80%	5,40 ± 0,48 ^{bc}	94,60 ± 0,48 ^{ab}	36,25 ± 6,60 ^a	35,40 ± 16,36 ^a	4,13 ± 0,02 ^b	0,40 ± 0,02 ^a	4,77 ± 0,15 ^a	11,90 ± 0,52 ^{bc}
Ефект дефіциту зрошення								
Open	6,67 ± 0,44 ^b	93,33 ± 0,44 ^a	37,26 ± 3,75 ^b	34,54 ± 9,13 ^b	4,32 ± 0,03 ^b	0,31 ± 0,01 ^a	4,93 ± 0,15 ^b	15,85 ± 0,67 ^b
OpenST	6,49 ± 0,62 ^b	93,51 ± 0,62 ^a	40,16 ± 3,65 ^a	32,30 ± 11,55 ^b	4,37 ± 0,02 ^{ab}	0,32 ± 0,02 ^a	5,20 ± 0,36 ^{ab}	16,03 ± 0,48 ^b
OpenCon	8,28 ± 0,52 ^a	91,72 ± 0,52 ^b	34,94 ± 3,98 ^b	47,66 ± 13,48 ^a	4,41 ± 0,03 ^a	0,29 ± 0,01 ^a	5,67 ± 0,15 ^a	19,26 ± 0,62 ^a

Дані представляють середні значення 5 вибірок (n = 30), за винятком pH, загальної концентрації в крові (TSS) та загальної концентрації в крові (ТА) (n = 3). Середні значення, що йдуть за різними літерами в одному стовпці, суттєво відрізнялися (p < 0,05) за критерієм Таккі.