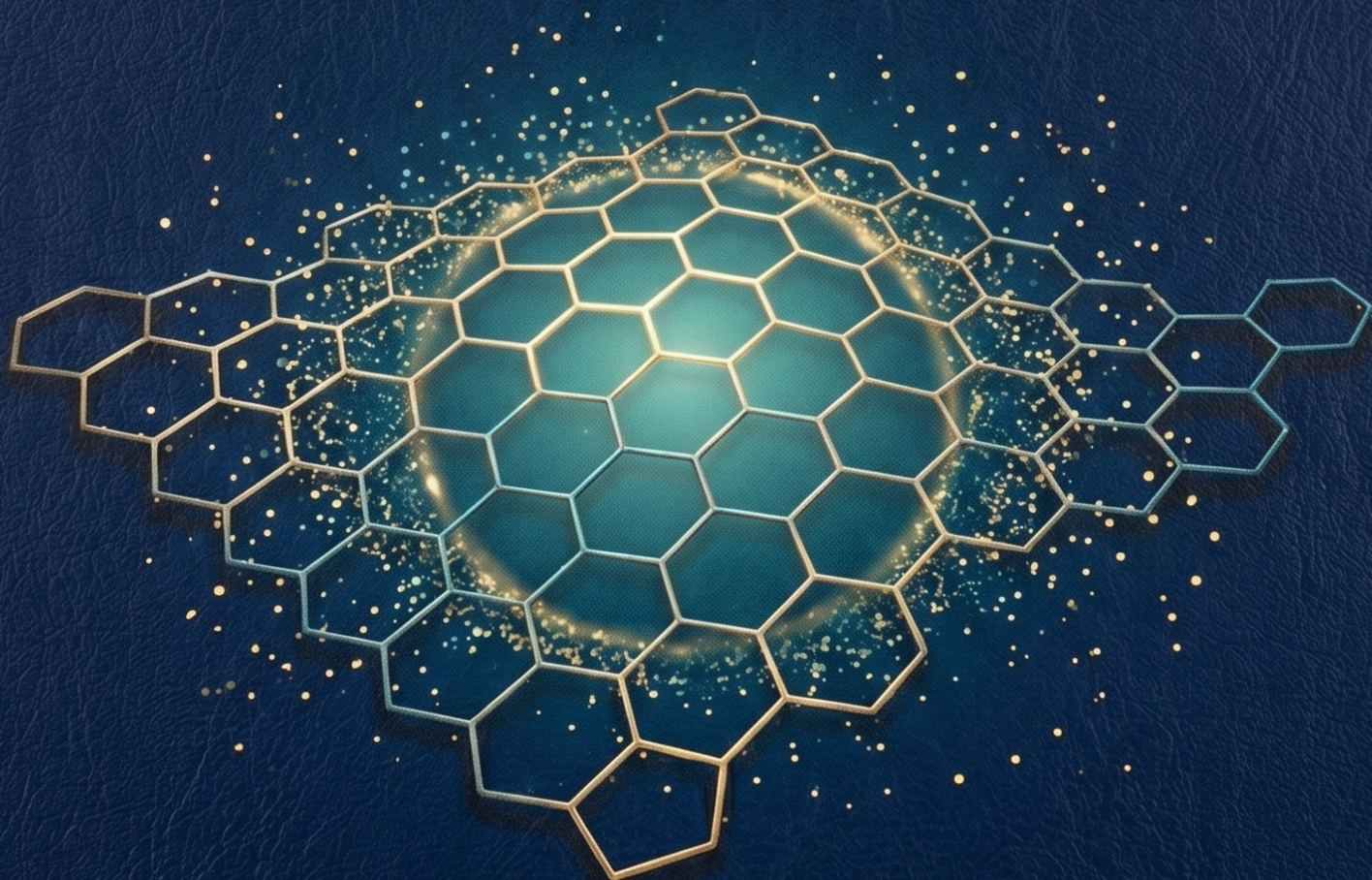


В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк

# ГРАФЕН В ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ,  
ЦИРКУЛЯРНА ЕКОНОМІКА,  
РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Частина 1



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк**

**ГРАФЕН В ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕХНОЛОГІЯХ:  
ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ, ЦИРКУЛЯРНА ЕКОНОМІКА,  
РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**Частина 1**

Монографія

Вінниця  
ВНТУ  
2026

УДК 681.784: 616-073.56

ПЗ1

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 13 від 21.05.2026 р.).

Рецензенти:

**В. О. Комар**, доктор технічних наук, професор

**П. К. Ніколюк**, доктор фізико-математичних наук, професор

**Петрук, В. Г.**

ПЗ1 Графен в природоохоронних технологіях: екологічний моніторинг, циркулярна економіка, ресурсоенергозбереження. Частина 1 : монографія / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк. Електрон. текст. дані. Вінниця : ВНТУ, 2026. 103 с.

ISBN 978-617-8163-92-1

Монографія присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми обґрунтування та застосування інноваційних наноматеріалів на основі графену в природоохоронних технологіях, екологічному моніторингу та відновлювальній енергетиці.

Вдосконалено математичну модель селективних біосенсорів на основі графенового польового транзистора для детекції важких металів у водному середовищі. Аналіз матеріальних потоків у процесах рециклінгу та комплексна оцінка життєвого циклу графенових матеріалів підтверджують їх еколого-економічні переваги в парадигмі циркулярної економіки.

УДК 681.784: 616-073.56

DOI: <https://doi.org/10.31649/617.8163.92.1>

ISBN 978-617-8163-92-1

© В. Петрук, С. Кватернюк, 2026

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	5
ВСТУП.....	6
1 СТРАТЕГІЧНІ ПРІОРИТЕТИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТА ЕКОМОДЕРНІЗАЦІЇ НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ В КОНТЕКСТІ РЕСУРСОЕФЕКТИВНОГО ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ .....	8
1.1 Теоретико-прикладні засади декарбонізації та екомодернізації в умовах глобальних змін клімату.....	8
1.2 Динаміка впровадження відновлювальних джерел енергії, систем акумуляції та ресурсоощадних технологій.....	9
1.3 Висновки .....	16
2 СТРАТЕГІЧНІ ОРІЄНТИРИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ГЕЛІОЕНЕРГЕТИКИ В МЕЖАХ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ.....	17
2.1 Екологічний та ресурсний потенціал сонячної генерації у стратегії зменшення вуглецевого сліду .....	17
2.2 Сучасний стан і технологічні основи розвитку геліоенергетики.....	18
2.3 Висновки .....	24
3 АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТОНКОПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВІ ГРАФЕНУ В ПРОЦЕСАХ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТА ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ.....	25
3.1 Екологічні загрози та управління відходами сонячної генерації.....	25
3.2 Стан проблеми та постановка завдань дослідження утилізації фотоелектричних систем .....	25
3.3 Аналіз методів інтеграції графену в тонкоплівкові сонячні панелі.....	27
3.4 Порівняльна модель аналізу матеріальних потоків для управління життєвим циклом фотоелектричних панелей.....	29

4	МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ ЗОННОЇ СТРУКТУРИ МОНОШАРОВОГО ТА ВЕРТИКАЛЬНО ВИРОЩЕНОГО ГРАФЕНУ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ СИЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ .....	35
4.1	Моделювання електронної структури графену .....	35
4.2	Структура та властивості графену .....	36
4.3	Модель сильного зв'язку в дослідженні графену .....	39
4.4	Моделювання вертикально вирощеного графену .....	44
4.5	Висновки .....	46
5	СЕЛЕКТИВНІ БІОСЕНСОРИ НА ОСНОВІ ГРАФЕНУ В ЕКОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРИНГУ .....	48
5.1	Сенсорні технології на основі графену .....	48
5.2	Технологічні засади створення графенових біосенсорів .....	49
5.3	Математична модель графенового польового транзистора на прикладі вимірювання концентрації іонів свинцю у водному середовищі.....	54
5.4	Інтеграція з технологіями IoT та штучним інтелектом .....	62
5.5	Висновки .....	63
6	ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЙ ВИКОРИСТАННЯ ГРАФЕНУ .....	64
6.1	Еволюція технологій використання графену .....	64
6.2	Теоретико-методологічні засади економіки природокористування в контексті інновацій .....	68
6.3	Цикл Гартнера як інструмент еколого-економічного аналізу .....	70
6.4	Технологічна зрілість та ринкова динаміка.....	73
6.5	Оцінка життєвого циклу графенових матеріалів .....	75
6.6	Математичне моделювання еколого-економічної ефективності графену .....	78
6.7	Висновки та рекомендації для політики природокористування .....	82
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	84
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	86
	ДОДАТОК А – ПРОГРАМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГО- ЕКОНОМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГІЙ ВИКОРИСТАННЯ ГРАФЕНУ .....	96

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CNT – вуглецеві нанотрубки  
CPU – центральні процесори  
EoL – кінець терміну експлуатації  
EPR – розширена відповідальність виробника  
ETL – шар транспортування електронів  
EVA – етиленвінілацетат  
GFET – графеновий польовий транзистор  
GNP – графенові нанопластинки  
GNR – графенові нанострічки  
GO – оксид графену  
GQD – графенові квантові точки  
GWP – потенціал глобального потепління  
IoT – інтернет речей  
LCA – оцінка життєвого циклу  
LIG – лазерно-індукований графен  
LOD – межа виявлення  
MFA – аналіз матеріальних потоків  
MIP – молекулярно-імпринтовані полімери  
PV – фотоелектрична (сонячна) енергетика  
rGO – відновлений оксид графену  
SSbD – безпечний та сталий за дизайном  
STM – скануюча тунельна мікроскопія  
TB – модель сильного зв'язку  
TCE – прозорий провідний електрод  
TPU – тензорні процесори  
VG – вертикально вирощений графен  
ВДЕ – відновлювальні джерела енергії  
ВЕС – вітрові електростанції  
ІЧ – інфрачервоний (спектр)  
ККД – коефіцієнт корисної дії  
СЕ – сонячні елементи  
СЕС – сонячні електростанції  
УФВ – ультрафіолетове випромінювання  
ФЕ – фотоелементи  
ФЕП – фотоелектричні перетворювачі  
ЦСР – Цілі сталого розвитку

## ВСТУП

Глобальні зміни клімату, які спричиняють підвищення середньорічної температури та загрожують екологічними катастрофами, вимагають невідкладного переходу до декарбонізації та екомодернізації економіки. Для післявоєнної відбудови України ефективною альтернативою застарілим вуглецевим технологіям є всебічне впровадження відновлювальних джерел енергії, зокрема сонячної генерації, та інноваційних природоохоронних технологій. Важливу роль у цьому відіграє графен – новітній двовимірний наноматеріал, який завдяки своїм унікальним електронним, оптичним та механічним властивостям є фундаментом для новітніх технологій. Використання графену у тонкоплівкових сонячних панелях дозволяє зменшити матеріальний слід та вирішити проблему утилізації токсичних відходів традиційної фотовольтаїки в межах парадигми циркулярної економіки. Крім того, нагальною є проблема забруднення довкілля важкими металами, що потребує створення високочутливих селективних графенових біосенсорів для екологічного моніторингу в режимі реального часу. Відтак, для успішного масштабування графенових технологій виникає необхідність математичного моделювання їхньої електронної структури і сенсорних властивостей, а також проведення глибокої еколого-економічної оцінки їхнього життєвого циклу на шляху до сталого розвитку.

Актуальність теми зумовлена необхідністю наукового обґрунтування та впровадження інноваційних технологій на основі графену в сферах сонячної генерації, екологічного моніторингу та циркулярної економіки для забезпечення ресурсоенергоєфективної післявоєнної відбудови України з урахуванням еколого-економічної ефективності цих матеріалів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є теоретико-прикладне обґрунтування застосування графену в природоохоронних технологіях, підвищення достовірності екологічного моніторингу за допомогою селективних графенових біосенсорів та комплексна еколого-економічна оцінка їхнього життєвого циклу.

Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати такі задачі:

– здійснити аналіз сучасних тенденцій, трендів і технологій декарбонізації та екомодернізації економіки повоєнної України на основі відновлювальних джерел енергії;

– провести порівняльний аналіз матеріальних потоків та потенціалу тонкоплівкових панелей на основі графену для створення замкненого циклу виробництва (циркулярної економіки) в сонячній енергетиці;

– розробити та апробувати обчислювальні підходи на базі методу сильного зв'язку для розрахунку електронної зонної структури вертикально вирощеного графену;

– проаналізувати механізми функціонування та розробити математичну модель графенового біосенсора на основі польового транзистора (GFET) для екологічного моніторингу важких металів у воді;

– здійснити комплексну еколого-економічну оцінку технологій використання графену із застосуванням методології циклу Гартнера (Gartner Hype Cycle) та оцінки життєвого циклу (LCA).

**Об'єкт досліджень** – процес застосування графенових наноматеріалів у природоохоронних технологіях, системах екологічного моніторингу та відновлювальній енергетиці.

**Предмет дослідження** – методи, математичні моделі, біосенсорні системи та еколого-економічні засади використання графену для потреб ресурсоенергозбереження та циркулярної економіки.

**Методи дослідження.** У роботі використані методи аналізу матеріальних потоків (MFA) на основі принципу масового балансу для оцінки життєвого циклу фотоелектричних панелей; напівемпіричний метод сильного зв'язку (tight-binding model) для розрахунку та моделювання електронної зонної структури графену; методи математичного моделювання фізико-хімічних процесів (рівняння Дірака, модель дрейфу-дифузії, ізотерма Хілла-Ленгмюра) для аналізу роботи графенових польових транзисторів (GFET); методи економіки природокористування, зокрема методологія циклу Гартнера, аналіз життєвого циклу (LCA), модель декаплінгу Тапіо та диференціальні моделі логістичного зростання для розрахунку еко-ефективності інновацій.

*Електронне наукове видання*

**Петрук Василь Григорович**  
**Кватернюк Сергій Михайлович**

**ГРАФЕН В ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕХНОЛОГІЯХ:  
ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ, ЦИРКУЛЯРНА ЕКОНОМІКА,  
РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**Частина 1**

Монографія

Видається в авторській редакції

Рукопис підготовлено *С. Кватернюком*

Оригінал-макет виготовлено у *PBB ВНТУ*

Підписано до видання 05.06.2026 р.

Гарнітура Times New Roman.

Зам № P2026-070.

Видавець та виготовлювач  
Вінницький національний технічний університет,  
Редакційно-видавничий відділ.  
ВНТУ, ГНК, к. 114. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

**press.vntu.edu.ua;**

*E-mail:* rvv.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.