

**Міністерство освіти і науки України**  
Сумський державний університет (СумДУ)  
40017, м.Суми, вул. Римського-Корсакова, 2; тел. (0542)330172,  
факс (0542)334049, E-mail: kanc@sumdu.edu.ua

ПОГОДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
д-р фіз.-мат. наук, професор

\_\_\_\_\_Анатолій ЧОРНОУС

**ПРОМІЖНИЙ ЗВІТ**  
**за результатами виконання етапу наукової (науково-технічної) роботи**  
(звіт про проміжні результати проекту)  
*«Встановлення механізмів взаємодії МХене з біологічними системами»*

Науковий керівник проекту

\_\_\_\_\_

(підпис)

Максим ПОГОРЄЛОВ

2023 рік, II етап

Підготовку звіту завершено 23 грудня 2023 р.

1. Номер державної реєстрації проєкту: 0122U000784
2. Номер договору, за яким надається фінансування (за наявності): \_\_\_\_\_
3. Найменування організації-виконавця проєкту/грантоотримувача: Сумський державний університет
4. Прізвище та ім'я наукового керівника (головного дослідника, principal investigator (PI)) проєкту: Максим ПОГОРСЛОВ
5. Місце основної роботи наукового керівника: Сумський державний університет, ЦККНО МІ «Центр біомедичних досліджень»
6. Терміни та тривалість виконання проєкту:
  - Тривалість проєкту 36 місяців
  - Початок 01.01.2022
  - Закінчення 31.12.2024
  - Тривалість звітнього етапу 12 місяців
  - Початок 01.01.2023
  - Закінчення 31.12.2023
7. Обсяги фінансування проєкту:
  - Загальний обсяг фінансування:
  - за запитом (заявкою) 1 654 тис.грн (*формат 1000,5*)
  - фактичний 1 475 тис.грн
  - Обсяг фінансування звітнього етапу:
  - за запитом (заявкою) 558,0 тис.грн
  - фактичний 334,8 тис.грн
8. Перелік виконавців з оплатою праці (ПІБ, посада за основним місцем роботи, посада за проєктом (або договір ЦПХ), окремо зазначаються молоді вчені, студенти, аспіранти (за наявності)) (**Додаток 1 до звіту**).
9. Стислий зміст проєкту в цілому (актуальність, мета, основні завдання, ідеї, гіпотези тощо) (до 20 рядків):
 

MXene – новий клас наноламінатів, які є карбідами та карбонітридами перехідних металів. Даний клас речовин відкритий у 2011 році вченим українського походження Юрієм Гогоці являє собою найперспективніший матеріал, який за своїми властивостями перевищує графен та використовується для створення акумуляторів, наносенсорів, засобів гнучкої електроніки, антен, тощо. Останніми роками відкриті перспективи використання MXene в медицині, зокрема як протипухлинного засобу, носія лікарських речовин, антибактеріального та антивірусного агенту, медичних електродів, тощо. При цьому, фундаментальні механізми взаємодії MXene з біологічними системами, його біосумісність, іммуногенність, загальна токсичність та шляхи метаболізму до сьогодення системно не вивчались.

Проєкт направлений на отримання нових знань з встановлення механізмів взаємодії MXene з біологічними системами, зокрема встановлення біосумісності та токсичності для різних MXene, які мають перспективи до застосування в медицині ( $Ti_3C_2$ ,  $Ti_3C_2T_x$ ,  $Nb_2C$ ,  $Ta_4C_3$ ). Будуть отримані данні щодо імунної відповіді ex-vivo та in-vivo, шляхів їх метаболізму та загальної токсичності та можливості їх застосування для протипухлинної та антибактеріальної терапії. Отримані знання ляжуть в основу розробки нових лікарських засобів та методів неінвазивної терапії раку.
10. Основні результати виконання попереднього (за наявності) етапу (до 20 рядків)

За час виконання попереднього етапу отримані данні щодо залежності латеральних розмірів наноламінітів від типу деламінування, встановлено, що застосування ультразвукової обробки дозволяє отримати моношар MXene з латеральними розмірами від 170 нм до 3 мкм. На поверхні наноламінітів визначені залишки фтору, у кількості, яка не впливає на біологічні властивості. Встановлені межі токсичності для MXene  $Ti_3C_2$  з латеральними розмірами 4 мкм, яка становить біля 90 мкг/мл. Нами не встановлена різниця взаємодії MXene  $Ti_3C_2$  з клітинами різних ліній: остеобластами, фібробластами, мезенхімальними стовбуровими клітинами, що свідчить про універсальність взаємодії MXene  $Ti_3C_2$  з біологічними системами. Також встановлена здатність MXene до редукції резазуріну, що впливає на інтерпретацію результатів експерименту з визначення біосумісності та може давати хибно-позитивний результат. Встановлена здатність MXene пригнічувати ріст пухлинних клітин при опроміненні лазером ближнього інфрачервоного діапазону. На основі отриманих даних запропонований механізм протипухлинної дії MXene, який полягає в можливості впливати як на некроз, так і апоптоз пухлинних клітин.

11. Номер та назва звітнього етапу (за наявності):

Етап 2 Дослідження механізмів взаємодії системи «MXene-мікроорганізм» та «MXene-соматична клітина»

12. Опис процесу реалізації (хід виконання, які дослідження проводились, які методики використовувались тощо) проекту за звітним етапом (до 50 рядків)

MXene були синтезовані у співпраці з ТОВ «Центр матеріалознавства» (MRC, Київ).  $Ti_3C_2T_x$  MXene (Т-ОН, Cl або F) отримували травленням шаруватого потрійного карбиду  $Ti_3AlC_2$  (312 MAX-фаза) сумішшю соляної (HCl) кислоти та фториду літію (LiF) за методом синтезу мінімального інтенсивного шарового розшарування (MILD). Після травлення отриману суспензію MXene промивали дистильованою водою шляхом повторного центрифугування (10 хв кожен цикл при 3500 об/хв), щоб видалити надлишок кислоти. Після кожного циклу кислий супернатант декантували, потім додавали свіжу порцію деіонізованої (DI)-води, повторно диспергували і проводили ще один цикл центрифугування. Промивання проводили до тих пір, поки значення рН надосадової рідини не досягало 6. Отриману вологу суспензію, що містила MXene, піддавали процесу деламінуванню з метою відокремлення двовимірних частинок MXene  $Ti_3C_2T_x$  у колоїдний розчин на водній основі.

Під час виконання даного етапу ми розробили тривимірну полімерну мембрану з нанесеними на її поверхню MXene. Полікапролактонові мембрани були виготовлені методом електропрядіння. Готовий PCL розчин набирали в скляний шприц об'ємом 5,0 мл з внутрішнім діаметром голки 0,8 мм. Процес електропрядіння проводили за кімнатної температури та відносної вологості повітря 20–25 % в ізольованій шафі з ламінарним потоком повітря в промисловій установці RT-Advanced (Linari Engineering, Піза, Італія). Параметри електропрядіння встановлювали таким чином: швидкість потоку – 1 мл/год, напруга на голці – 17 кВ, відстань між голкою і колектором становила 17,0 см та швидкість обертання колектора (діаметром 7 см) – 350 об/хв.

Дослідження фізико-хімічних та структурних і функціональних властивостей MXene та мембран проводили за допомогою таких методів як сканувальна електронна мікроскопія, аналіз інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є, трансмісійна електронна мікроскопія, Раман спектроскопія, спектроскопія втрат енергії електронів, 3D візуалізація мембран, визначення контактного кута мембран, дослідження статичної та динамічної деградації (in vitro). Біологічні властивості (цитотоксичність,

біосумісність та здатність підтримувати проліферацію клітин на поверхні мембран) оцінювали в культурі клітин фібробластів.

13. Результати виконання звітнього етапу відповідно до технічного завдання/календарного плану:

13.1 Заплановані завдання звітнього етапу проєкту (*перерахуйте завдання звітнього етапу, окреслені у запиті (технічному завданні/календарному плані) проєкту*) (до 20 рядків):

Упродовж другого етапу було заплановано визначення антибактеріальних рівнів МХене різного складу та отримати результати фагоцитарної активності клітин крові в залежності від виду та розміру МХене, а також дані щодо структури та проникності мембран фагоцитів та моноцитів при співкультивуванні з МХене. Окремо було заплановано отримати дані синтетичної активності клітин крові (рівні цитокінів) при співкультивуванні з МХене

13.2 Отримані результати звітнього етапу проєкту (*опишіть отримані результати виконавцями протягом звітнього періоду, посилаючись на заплановані та досягнуті цілі, задачі та індикатори виконання, згадані в технічному завданні/календарному плані дослідження. Включіть посилання на публікації у наукових виданнях, інші показники з п. 18, що є підтвердженням досягнення результатів виконання етапу, якщо такі показники передбачені*) (до 70 рядків):

Упродовж виконання етапу визначені межі токсичності для МХене Nb4C3 з розміром 180 нм та встановлено, що наноматеріали в концентрації до 50 мкг/мл не спричиняють токсичного впливу на мезенхімальні стовбурові клітини, фібробласти, кератиноцити та клітини мишачої меланоми.

Зокрема, як з покриттям PDA, так і без нього, карбід ніобію мав помірний дозозалежний цитотоксичний ефект. Культура DFB була більш чутливою до всіх типів тестованих зразків. Для Nb3C3 та Nb3C3-PDA(2h), концентрація 6,25 мкг/мл не відрізнялася значно від контрольних клітин ( $p > 0.05$ ). Зі збільшенням концентрації наноматеріалу відповідно зростав токсичний вплив на клітини. Nb3C3-PDA(1h) демонстрували меншу токсичність; на шостий день експерименту рівень зниження резазурину наноматеріалом при концентрації 25 мкг/мл відповідав контрольним значенням. Також характерно для Nb3C3 та Nb3C3-PDA(2h) на DFB, що при високих концентраціях дані на третій день були нижчими, ніж на перший, що також може вказувати на токсичність цих зразків при концентраціях вище 25 мкг/мл. На шостий день, за винятком Nb3C3-PDA(2h) при концентрації 100 мкг/мл, спостерігалися найвищі рівні зниження резазурину ( $p < 0.05$ ).

Клітини HaCaT були менш чутливі до всіх типів наноматеріалів. У перший день дослідження значної різниці між тестовими та контрольними лунками не спостерігалося ( $p > 0.05$ ). На третій день спостерігалося значне збільшення відсотка зниження резазурину, рівень якого був значно нижчим, ніж у контрольних клітин ( $p < 0.05$ ). На шостий день експерименту дані Nb3C3 були значно вищими, ніж на третій день, але мали статистичну різницю з

контрольними лунками ( $p < 0.05$ ). Для Nb3C3-PDA(1h), за винятком концентрації 100 мкг/мл, рівень зниження резазурину відповідав контрольним клітинам. На шостий день експерименту для Nb3C3-PDA(2h) не спостерігалось статистично значущої різниці ( $p > 0.05$ ).

Пухлинні клітини (B16F10) були найбільш стійкими до впливу наноматеріалів, незалежно від того, чи були вони покриті PDA. Для Nb3C3 на перший і третій дні експерименту рівень зниження резазурину був мінімально нижчим ( $p < 0.05$ ) у контрольних лунках. В той же час на шостий день значних відмінностей між групами не спостерігалось ( $p > 0.05$ ). Така ж тенденція спостерігалася при використанні Nb3C3-PDA(2h). Однак, абсолютний відсоток зниження резазурину був нижчим на третій день дослідження порівняно з Nb3C3. На шостий день експерименту значних відмінностей з контрольними клітинами не виявлено ( $p > 0.05$ ).

Особливо варто зазначити, що при використанні Nb3C3-PDA(1h) при концентрації 100 мкг/мл спостерігався помірний токсичний ефект на всіх трьох етапах дослідження, подібно до даних за клітинами HaCaT для цієї концентрації. На третій день експерименту з Nb3C3-PDA(1h) рівень зниження резазурину за всіма концентраціями був значно нижчим, ніж у нелікованих клітин ( $p < 0.05$ ). Однак, до кінця дослідження зниження резазурину було значно вищим, ніж контрольний рівень за досліджуваними концентраціями від 6.25 до 50 мкг/мл ( $p < 0.05$ ). Також характерно для B16F10 та HaCaT, що не спостерігалася дозозалежна цитотоксичність, за винятком зразків з концентрацією 100 мкг/мл.

Розроблена технологія створення полімерної тривимірної нановолоконної мембрани з іммобілізованими Nb3C3 MXene, що забезпечує її електропровідність. У дослідженні використовували метод електропрядіння для отримання високопористих та нановолокнистих мембран на основі біосумісного, біодеградаючого, механічно стабільного синтетичного полімеру – полікапролактону. Основна особливість використання методу електропрядіння це отримання тривимірних мембран з рандомно орієнтованими нановолокнами, що створює подібність до структури позаклітинного матриксу. Отримані мембрани мали розподіл товщини волокон від менше 0,5 мкм до 2 мкм та розмір пор в діапазоні від 1 до 4 мкм<sup>2</sup>. Зменшення контактного кута поверхні PCL мембрани з  $130 \pm 3^\circ$  до менше ніж  $80^\circ$  після хімічної обробки та майже до  $0^\circ$  після використання кисневої плазми дозволило використати метод *deer coating* для іммобілізації  $Ti_3C_2T_x$  MXene. Даний метод забезпечив рівномірний розподіл 2Д наноматеріалів по площі та глибині мембрани, що мало забезпечити відповідну електропровідність. Метод енергодисперсійної спектроскопії дозволив визначити наявність титану в атомній концентрації від 2,42% до 5,79%, що свідчить про наявність MXene на поверхні матеріалу. Додаткова обробка мембрани кисневою плазмою з метою зменшення контактного кута поверхні достовірно не вплинула на вміст титану на поверхні мембрани. Використання методів трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) при малому збільшенні та висококутові кільцеві зображення в темному полі (HAADF) сканувальної

трансмисійної електронної мікроскопії (STEM), а також протонної анігіляції дозволило з'ясувати наявність зв'язків між волокнами мембрани (PCL) та MXene. Зазначені данні свідчать про формування композитного матеріалу з високою стабільністю. Сканувальна електронна мікроскопія (SEM) поперечного перетину мембран свідчить про нерівномірне розташування MXene по профілю матеріалу і його penetрацію лише на 25-30% щодо товщі мембрани.

Імпрегнація MXene в товщу PCL мембрани дозволила зменшити контактний кут поверхні до  $81 - 92^\circ$ , при цьому зі збільшенням кількості шарів MXene гідрофільність матеріалу зменшується, що може свідчити про формування агломератів двовимірних наноматеріалів на поверхні мембрани. Додаткова обробка кисневою плазмою дозволяє при цьому створити гідрофільну поверхню матеріалу з контактним кутом близько  $0^\circ$ . Висока гідрофільність поверхні має забезпечити адсорбцію білків після контакту з кров'ю під час імплантації, що створюватиме сприятливі умови для адгезії клітин.

Вивчення швидкості деградації та водопоглинання тривимірних конструкцій PCL-MXene в статичних та динамічних умовах показав, що додаткова обробка кисневою плазмою чистих мембран та з нанесеними двовимірними нанолaminaми MXene прискорює швидкість деградації разом зі збільшенням водопоглинання. У свою чергу швидкість деградації нанокompозитів при динамічних умовах була більшою за статичну. Встановлено, що PCL-MXene мембрани показали високу біосумісність, здатність до адгезії клітин та їх проліферації. Флюорисцентна мікроскопія продемонструвала рандомне розташування клітин звичної форми вздовж волокон мембран з формуванням «симпласту». При цьому матеріали не показали наявності антибактеріальних властивостей.

13.3 Відхилення від календарного плану дослідження (за наявності) *(вказіть та детально обґрунтуйте можливі відхилення від технічного завдання/календарного плану дослідження та їх потенційний вплив на подальше виконання проекту (до 30 рядків):*

Упродовж виконання етапу відбулось відхилення від технічного завдання у визначенні антибактеріальної активності MXene та їх впливу на синтетичну активність клітин крові, зокрема макрофагів. Відхилення обумовлено збільшенням часу проведення експериментів, зокрема через проблеми з освітленням на початку року (неможливість виконання експериментів в культурі клітин та з мікроорганізмами). При цьому всі заплановані експерименти проводяться в повному обсязі. Відхилення від технічного завдання не призведе до порушень виконання проекту.

14. Наукова цінність і актуальність отриманих результатів (науково-технічної продукції), їх порівняння з українськими та/або кращими закордонними аналогами (до 30 рядків):

Вперше було синтезовано композитні тривимірні мембрани на основі полікапролактону з інтеграцією двовимірних наноструктурованих матеріалів MXene, демонструючи потенціал для підтримки клітинної проліферації та забезпечення електропровідності, критично необхідної для модуляції нервових сигналів. Методика

електропрядіння була аплікована для створення пористої структури з випадково орієнтованими волокнами, що ефективно імітує екстрацелюлярний матрикс. Дана робота ініціює новаторський підхід до іммобілізації Ti3C2Tx MXene на поверхні та у внутрішніх шарах мембран на основі полікапролактону через процес deer coating, при цьому визначаючи структурні та фізико-хімічні характеристики отриманого композиту.

Було здійснено первинне дослідження біосумісності мембран PCL-MXene, що підтвердило їх здатність сприяти клітинній проліферації, незалежно від способу модифікації матеріалу.

Дослідження також опровергло гіпотезу про антибактеріальні властивості Ti3C2Tx MXene у складі композитних полімерних матеріалів, що, ймовірно, пов'язано з їх стабільною хімічною структурою.

15. Практична цінність результатів для потреб оборони, безпеки, економіки та/або суспільства України (у разі наявності) (до 30 рядків):

Дослідження представляє новаторський метод синтезу полімерних електропровідних матеріалів, базуючись на технології deer coating для ефективної іммобілізації Ti3C2Tx MXene на поверхні полікапролактонових електропрядних мембран. Ця технологія надає можливості для розробки інноваційних тканинно-інженерних конструкцій, що знаходять застосування у сферах створення електропровідних тканин для кардіоваскулярної системи, м'язових і нервових тканин, а також у виробництві wearable devices та електродів. Розширене розуміння інтеракцій між Ti3C2Tx MXene та PCL мембранами сприяє глибшому осмисленню механізмів іммобілізації двовимірних матеріалів на полімерних матрицях. Це відкриває широкі перспективи для розробки високофункціональних біоматеріалів, що знайдуть застосування у тканинній інженерії та регенеративній медицині.

Завдяки здатності MXene перетворювати світлову енергію на тепло, виникли нові перспективи для застосування цих матеріалів у фототермічній терапії, зокрема для лікування гнійних ран, підкреслюючи потенціал використання цих інноваційних матеріалів у медицині.

16. Основні кількісні показники/індикатори\* виконання звітнього етапу **за темою** проєкту (у звіті залишити лише ті показники з таблиці, які планувались у запиті (заявці/договорі на отримання фінансування (надання грантової підтримки)), із зазначенням відповідного фактичного кількісного виконання цих показників/індикаторів. Якщо у запиті (заявці тощо) кількісні показники не планувались, то у звіті можуть зазначатись лише показники у разі їх наявності виконання):

№ з/п	Показники/індикатори	Заплановано (відповідно до запиту на фінансування /ТЗ/КП тощо), кількість	Виконано (за результатами етапу), кількість
1.	<b>Публікація результатів:</b>		
1.1.	Статті у журналах, що індексуються наукометричними базами даних:		
	- Scopus та/або Web of Science Core Collection, всього, од.	3	2
	з них із квантилем Q1 і Q2 на момент опублікування, од.	3	2

№ з/п	Показники/індикатори	Заплановано (відповідно до запиту на фінансування /ТЗ/КП тощо), кількість	Виконано (за результатами етапу), кількість
	з них із квартилем Q3 і Q4 на момент опублікування, од.		
1.6.	Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України та не індексуються наукометричними базами даних Scopus або Web of Science Core Collection, од.	0	3
1.7.	Монографії та розділи монографій, опубліковані (або підготовлені і подані до друку) у закордонних видавництвах іноземними мовами, од.	1	0
2.	<b>Презентація та дисемінація результатів:</b>		
2.5.	Представлення інформації про результати проєкту на науково-популяризаційних заходах (Дні науки, Наукові пікніки тощо) , од.	0	1
2.6.	Інші заходи, які не описані у пп. 2.1-2.5, од.		
3.	<b>Підготовка наукових кадрів:</b>		
3.2.	Захищено дисертацій доктора філософії авторами проєкту або під керівництвом авторів у рамках тематики проєкту, од.	1	1
4.	<b>Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності (ОПІВ)</b>		
4.3.	Отримано патентів України на корисну модель, од.	1	0
5.	<b>Впровадження та використання наукових або науково-технічних (прикладних) результатів:</b>		
5.1.	Підписання (укладання) договорів (угод) організацією-виконавцем проєкту (грантоотримувачем) на впровадження (використання) результатів проєкту (окрім індивідуальних), серед них:		
5.1.1	Господарських договорів/контрактів, од./тис.грн		
5.1.2	Ліцензійних договорів/договорів на ноу-хау, од./тис.грн		
5.1.3	Грантових угод (держаного рівня), од./тис.грн		
5.1.4	Грантових угод (міжнародного рівня), од./тис.грн	1	6/19 312,1
5.1.5	Інші договори (угоди), які не описані у пп. 5.1.1-5.1.3, од./тис.грн		
5.4.	Подано заявок на державні, міжнародні наукові гранти (окрім індивідуальних) , од.	2	6
5.5.	Впроваджено у освітній процес ЗВО/НУ з відповідним підтвердженням, од.	0	0
5.6.	Інші варіанти впровадження, які не описані у пп. 5.1-5.5, од.		
7.	<b>Участь з оплатою у виконанні проєкту (штатних одиниць/осіб) згідно з Додатком 1:</b>		
7.1.	Студентів (здобувачів вищої освіти I-II рівнів), шт.од./ осіб		
7.2.	Аспірантів (здобувачів вищої освіти III рівня) , шт.од./ осіб		1
7.3.	Молодих вчених, шт.од./ осіб		

\* - до показників/індикаторів таблиці п. 16 не можуть бути включені будь-які публікації (включно із співавторством), конференції, впровадження, охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності тощо держав (їх представників), визнаних в установленому порядку державою-агресором або державою-окупантом, або держав, що не визнають тимчасово окуповані, починаючи з березня 2014 року, території України такими, що належать Україні.

17. Відхилення від запланованих показників/індикаторів, зазначених у п. 16 (у разі наявності зазначити і обґрунтувати причини таких відхилень та їх вплив на подальше виконання проєкту) (до 20 рядків):

На час формування звіту на розгляді в журналах знаходиться 3 статті за матеріалами, які отримані під час виконання проєкту. Готується до подачі патент на корисну модель та глава в монографії англійською мовою.

Зокрема, подані до друку наступні публікації:



- Deineka V., Diedkova, K.; Husak, Y.; Korniienko, V.; Yanko, I.; Kyrylenko S.; Zahorodna, V.; Gogotsi, O.; Roslyk, I.; Baginskiy, · Ivan; Pogorielov M. Cytotoxic effects of different MXenes: dependence on size and chemical nature. *ASC Applied Materials and Interfaces* (IF – 10.7).
- Kyrylenko S.; Cjorna I.; Sulaieva O.; Diedkova K., Rishchupkin A.; Yanko I.; Pogorielov M.; Gogotsi Yu. Genotoxic effects of Ti and Nb MXenes. *Nanomaterials* (IF 6.0)
- Anastasia Konieva, Daniel Aguilar-Ferrer, Irina Kube-Golovin, Mykola Lyndin, Gunther Wennemuth, Volodymyr Deineka, Kateryna Diedkova, Viktoriia Korniienko, Alexey Lihachev, Veronika Zahorodna, Emerson Coy, Oleksiy Gogotsi, Wojciech Simka, Igor Iatsunsky, Maksym Pogorielov. Targeted melanoma cells ablation using MXene-PDA-antiCEACAM1 antibody complex. *Bioactive Materials* (IF – 18.9)

Готується до подачі патент на винахід «Створення електропровідних полімерних конструкцій для медицини та тканинної інженерії»

18. Вихідні дані щодо показників виконання відповідно до пунктів п. 16 (зазначити дані про публікації, конференції, захисти дисертацій, отримання ОПІВ, впровадження, створення НТП, залучення молодих вчених, студентів, аспірантів тощо) з додаванням WEB-посилання (за наявності) на ресурси, де вони розміщені:

1. Diedkova, K.; Husak, Y.; Simka, W.; Korniienko, V.; Petrovic, B.; Roshchupkin, A.; Stolarczyk, A.; Waloszczyk, N.; Yanko, I.; Jekabsons, K.; Čaplovičová, M.; Alexander, ·; Pogrebnyak, D.; Zahorodna, V.; Gogotsi, O.; Roslyk, I.; Baginskiy, · Ivan; Radovic, M.; Kojic, S.; Riekstina, U.; Pogorielov, · Maksym; Pogorielov Are Co-Last, M.; Pogorielov, M.; Lv, M. P. Novel Electrically Conductive Electrospun PCL-MXene Scaffolds for Cardiac Tissue Regeneration. *Graphene 2D Mater.* **2023**, 1–18. <https://doi.org/10.1007/S41127-023-00071-5>.
2. Diedkova, K.; Pogrebnyak, A. D.; Kyrylenko, S.; Smyrnova, K.; Buranich, V. V.; Horodek, P.; Zukowski, P.; Koltunowicz, T. N.; Galaszkiwicz, P.; Makashina, K.; Bondariev, V.; Sahul, M.; Caplovicova, M.; Husak, Y.; Simka, W.; Korniienko, V.; Stolarczyk, A.; Blacha-Grzechnik, A.; Balitskyi, V.; Zahorodna, V.; Baginskiy, I.; Riekstina, U.; Gogotsi, O.; Gogotsi, Y.; Pogorielov, M. Polycaprolactone-Mxene Nanofibrous Scaffolds for Tissue Engineering. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, 15 (11), 14033–14047. <https://doi.org/10.1021/ACSAMI.2C22780>.

Статті, подані до друку:

- Deineka V., Diedkova, K.; Husak, Y.; Korniienko, V.; Yanko, I.; Kyrylenko S.; Zahorodna, V.; Gogotsi, O.; Roslyk, I.; Baginskiy, · Ivan; Pogorielov M. Cytotoxic effects of different MXenes: dependence on size and chemical nature. *ASC Applied Materials and Interfaces* (IF – 10.7).
- Kyrylenko S.; Cjorna I.; Sulaieva O.; Diedkova K., Rishchupkin A.; Yanko I.; Pogorielov M.; Gogotsi Yu. Genotoxic effects of Ti and Nb MXenes. *Nanomaterials* (IF 6.0)

- Anastasia Konieva, Daniel Aguilar-Ferrer, Irina Kube-Golovin, Mykola Lyndin, Gunther Wennemuth, Volodymyr Deineka, Kateryna Diedkova, Viktoriia Korniienko, Alexey Lihachev, Veronika Zahorodna, Emerson Coy, Oleksiy Gogotsi, Wojciech Simka, Igor Iatsunsky, Maksym Pogorielov. Targeted melanoma cells ablation using MXene-PDA-antiCEACAM1 antibody complex. Bioactive Materials (IF – 18.9)

Виконавцями проекту подано наступні проекти за програмою Горизонт-Європа:

- HORIZON-CL4-2024-TWIN-TRANSITION-01-TWO-STAGE (Proposal ID – 101178979)
- HORIZON-WIDERA-2023-ACCESS-02 (Proposal ID – 101159592)
- HORIZON-HLTH-2024-TOOL-05-two-stage (Proposal ID – 101156003)
- HORIZON-CL4-2023-DIGITAL-EMERGING-01-CNECT (Proposal ID – 101135765)
- HORIZON-EIC-2023-PATHFINDEROPEN-01 (Proposal ID – 101128942)

За результатами конкурсу держбюджетного фінансування виконавці отримали 2 проекти:

- Корнієнко В.В. «Визначення оптимальних параметрів нових нановолокнистих біоматеріалів з гемостатичними властивостями для невідкладної та військової медицини» 60.12-24/26.3П-01
- Кириленко С.Д. "Імунологічні властивості нових графен-подібних двовимірних наноматеріалів мексенів (MXenes)" 60.12-24/26.3Ф-01

До виконання проекту були залучені аспіранти, зокрема з проведенням попереднього захисту дисертації на здобуття наукового ступеню доктора філософії:

*Дедкова К.А.* Регенерація міокарду при застосуванні нових MXene-вмісних електропровідних полімерних скафолдів, отриманих методом електропрядіння. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 222 «Медицина». – Навчально-науковий медичний інститут, Сумський державний університет, Суми, 2023. Захист запланований на 26 лютого 2024 року. – <https://sumdu.edu.ua/uk/science/science-info/scientific-infrastructure/specialized-council/one-time-specialized-council.html>

19. Рішення\*\* вченої (наукової, науково-технічної, технічної) ради або іншого керівного (дорадчого) органу (за відсутності зазначеної ради) організації-виконавця проекту щодо результатів розгляду проміжного звіту:

---

*(стисло зазначити текст висновку ради (органу) про відповідність/невідповідність виконаних за проектом робіт технічному завданню/календарному плану, номер та дату протоколу)*

\*\* - зазначається і надається лише у випадку наявності відповідних вимог від замовника/грантодавача. Також до звіту необхідно додати копію витягу з протоколу засідання відповідної ради (органу) в електронному (друкованому) вигляді (Додаток 3 до звіту).

20. Анотація основних результатів звітнього етапу проекту *(готується українською та англійською мовами (до 30 рядків кожною мовою), у форматі, придатному для розуміння загальною аудиторією (науково-популярним стилем) (Додаток 4 до звіту).*

**Додаток 1**  
**до проміжного звіту**

Перелік виконавців проєкту з оплатою праці

№	Прізвище, ім'я, науковий ступінь, вчене звання <i>(особистий підпис, у разі необхідності)</i>	Основне місце роботи або здобуття освіти	Зазначити вік та наявність статусу молодого вченого (на момент подання звіту)	Посада за проєктом (або договір ЦПХ) та роль у проєкті (керівник, відповідальний виконавець, виконавець, студент, аспірант тощо)	Основні завдання у проєкті (стисло зазначити функції)
1	Погорєлов Максим Володимирович	Сумський державний університет	45	Головний науковий співробітник, науковий керівник	Визначення антибактеріальної активності МХепе відносно різних мікроорганізмів Встановлення безпеки антибактеріальних доз Мхепе Дослідження механізмів фагоцитозу в культурі ex-vivo Визначення рівня синтезу цитокінів моноцитами в залежності від типу та розміру Мхепе.
2	Рощупкін Антон Андріанович	Сумський державний університет	24. молодий вчений	Фахівець, аспірант	Підготовка зразків для проведення досліджень, оформлення результатів досліджень

Копії наукових публікацій, охоронних документів, іншої друкованої наукової продукції

1. Diedkova, K.; Husak, Y.; Simka, W.; Korniienko, V.; Petrovic, B.; Roshchupkin, A.; Stolarczyk, A.; Waloszczyk, N.; Yanko, I.; Jekabsons, K.; Čaplovičová, M.; Alexander, ; Pogrebnyak, D.; Zahorodna, V.; Gogotsi, O.; Roslyk, I.; Baginskiy, · Ivan; Radovic, M.; Kojic, S.; Riekstina, U.; Pogorielov, · Maksym; Pogorielov Are Co-Last, M.; Pogorielov, M.; Lv, M. P. Novel Electrically Conductive Electrospun PCL-MXene Scaffolds for Cardiac Tissue Regeneration. *Graphene 2D Mater.* 2023 **2023**, 1–18. <https://doi.org/10.1007/S41127-023-00071-5>.
2. Diedkova, K.; Pogrebnyak, A. D.; Kyrylenko, S.; Smyrnova, K.; Buranich, V. V.; Horodek, P.; Zukowski, P.; Koltunowicz, T. N.; Galaszkiwicz, P.; Makashina, K.; Bondariyev, V.; Sahul, M.; Caplovicova, M.; Husak, Y.; Simka, W.; Korniienko, V.; Stolarczyk, A.; Blacha-Grzechnik, A.; Balitskyi, V.; Zahorodna, V.; Baginskiy, I.; Riekstina, U.; Gogotsi, O.; Gogotsi, Y.; Pogorielov, M. Polycaprolactone-Mxene Nanofibrous Scaffolds for Tissue Engineering. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, 15 (11), 14033–14047. <https://doi.org/10.1021/ACSAMI.2C22780>

**Додаток 3**  
**до проміжного звіту**

Копія витягу з протоколу засідання відповідної ради (органу) щодо результатів розгляду проміжного звіту

**Анотація основних результатів звітнього етапу проєкту**

Дослідження зробило важливий прорив у розробці нових біоматеріалів, дослідивши токсичність та властивості MXene Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub> наноматеріалів. З'ясувалось, що ці наноматеріали не токсичні для різних клітин, включаючи мезенхімальні стовбурові клітини, при концентраціях до 10 мкг/мл. Це відкриває шлях до їхнього використання в медицині та біотехнологіях.

Особливістю цього дослідження є створення полімерної тривимірної нановолоконної мембрани з MXene, яка не лише біосумісна але й провідна. Вона показала високу ефективність у деградації та водопоглинанні, особливо після обробки кисневою плазмою. Ці мембрани виявилися чудовим середовищем для росту і розвитку клітин, що важливо для регенеративної медицини.

Використання флюоресцентної мікроскопії показало, що клітини добре приживаються та ростуть на цих мембранах, формуючи здорові та активні структури. Однак, важливим відкриттям стало те, що ці матеріали не мають антибактеріальних властивостей, що вказує на необхідність додаткових досліджень у цьому напрямку. В цілому, результати показують обнадійливі перспективи MXene матеріалів у розвитку сучасних біомедичних технологій.

*We have made an important breakthrough in the development of new biomaterials by investigating the toxicity and properties of MXene Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub> nanomaterials. It was found that these nanomaterials are not toxic to various cells, including mesenchymal stem cells, at concentrations up to 10 µg/ml. This opens the way for their use in medicine and biotechnology.*

*A unique aspect of this research is the creation of a polymer three-dimensional nanofiber membrane with MXene, which is not only biocompatible but also conductive. It has shown high efficiency in degradation and water absorption, especially after treatment with oxygen plasma. These membranes proved to be an excellent environment for cell growth and development, which is important for regenerative medicine.*

*The use of fluorescent microscopy demonstrated that cells thrive and grow well on these membranes, forming healthy and active structures. However, an important discovery was that these materials do not possess antibacterial properties, indicating the need for additional research in this direction. Overall, the results show promising prospects for MXene materials in the development of modern biomedical technologies.*