

НЕОРГАНІЧНА ХІМІЯ

УДК 620.22.-032.36.-022.532

Ю. І. Андрусишин, Г. О. Сіренко

Синтез та фізико-хімічні властивості оксида графену (огляд)

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна, E-mail: fcss@pu.if.ua*

Досліджено і представлено метод синтезу графену модифікованим методом Хамера, а також проведено дослідження характеристик і властивостей отриманого матеріалу та варіанти його застосування. Представлений метод отримання графену характеризується відтворюваністю результатів, технологічною простотою і дозволяє у результаті одностадійного етапу синтезу отримати десятки грам кінцевого продукту. Метод не передбачає використання вибухонебезпечних чи токсичних реагентів.

Ключові слова: графен, властивості, отримання, застосування, нанотехнології, нанокompозити

Стаття постуила до редакції 20.09.2018; прийнята до друку 05.12.2018.

1. Вступ

1.1 Карбон - один з найпоширеніших первнів, який не перестає дивувати появою все нових й нових поліморфних модифікацій. У жодного іншого первня Періодичної системи немає такого розмаїття з'єднань. Поява графену, як нового вуглецевого наноб'єкту, - яскравий тому приклад.

Графен - один з найбільш перспективних матеріалів нанотехнології ХХІ ст. Такі властивості графену, як електропровідність, механічна міцність і хімічна стійкість, тощо, визначають перспективи його застосування у різних пристроях: в якості наноелементів високочастотних транзисторів, у сонячних батареях, сенсорах, суперконденсаторах та у різних композитних матеріалах, тощо.

1.2 Отримання графена відкрило новий розділ хемії - хемію 20-ти матеріалів, який включає, зокрема, дослідження функціонального графену (з приєднаними функціональними групами), цікавих для додатків в електроніці, оптиці, створення композитних матеріалів і каталізаторів[1-4]. Перші експерименти з графеном, отриманим механічним відшаруванням, показали його незвичайну електронну структуру, найвищу рухливість електричних носіїв заряду за кімнатної температури та прояв низки квантових ефектів (квантового ефекту Холла, ефекту балістичного транспорту, тощо)[5].

1.3 Спосіб виготовлення графену швидко став загальною проблемою, оскільки за

допомогою "скотч-методу", який передбачає використання шматків липкої стрічки, що відшарувалися пластівцями доти, поки не отримують шар графіту товщиною в один атом. За цим способом можна тільки ізолювати невеликі кількості графену і це досить трудомісткий процес[6-10]. Сучасні методи вельмимасового синтезу графену включають безліч варіацій так званого методу «Хамера», розробленого Вільямом Хамером у кінці 1950-х років[1]. Спосіб дозволяє використовувати потужні окислювачі і сильні кислоти, щоб отримати шари графену з графіту. За цим методом отримують оксид графену, а вже з нього - графен.

1.4 У даній роботі представлено метод синтезу графену модифікованим методом Хамера, а також проведено дослідження характеристик і властивостей отриманого матеріалу та варіанти його застосування.

1.5 Мета роботи полягала в отриманні графену із графіту модифікованим методом Хамера, експериментальному дослідженні фізико-хімічних властивостей синтезованих зразків із залученням методів ІЧ-спектральної аналізи та оптичної спектроскопії у видимому діапазоні довжин хвиль. У роботі запропоновано і розроблено унікальну методику отримання графену у відчутних кількостях (грами) за допомогою відновлення оксиду графену.

1.6 Представлений метод отримання графену характеризується відтворюваністю результатів, технологічною простотою і дозволяє у результаті одностадійного етапу синтезу отримати десятки грам кінцевого продукту. Метод

не передбачає використання вибухонебезпечних чи токсичних реагентів. Отримання графену у відчутних кількостях дозволить приступити до створення композиційних матеріалів на основі графенової матриці з високими механічними властивостями [11].

2. Основна частина

2.1 Для отримання графену хемічно модифікують [12] природний графіт з метою послабити міжплощинні взаємодії між графеновими шарами в графіті, щоб полегшити процес розпаду на окремі графенові платівки [13]. З цією метою здійснюють окиснення природного графіту до оксиду графіту, з наступним синтезом оксиду графену та його подальшим відновленням.

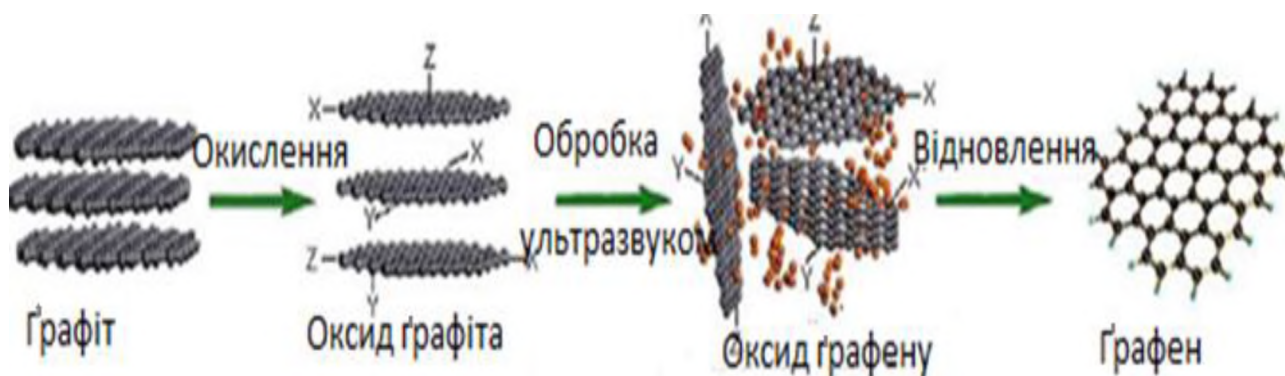


Рис. 1. Схема отримання графену через проміжне утворення оксиду графіту.

2.3. Прилади, що були потрібні для синтезу оксиду графену: 2 колби Ерленмейера (50 мл і 500 мл), ємність для льодяної ванни, нагрівач, термометр, годинник, ваги, мензурка, магнітна мішалка, рН-метр.

2.4. Матеріали, які використовувалися в досліді: 0,5 г дрібного графітового порошку; 0,5 г нітрату натрія (NaNO_3); сірчаної кислоти (H_2SO_4); 3 г перманганата калію (KMnO_4); 10 мл перекису водню (H_2O_2), дистильована вода ($\text{D}_2\text{H}_2\text{O}$), вода (H_2O).

На першому етапі роботи змішували 0,5 г графітового порошку, 0,5 г нітрату натрія (NaNO_3) та 23 мл сірчаної кислоти (H_2SO_4) у колбі. Отриману суміш поміщали у льодяну ванну і перемішували за допомогою магнітної мішалки протягом 4 годин за температури в колбі нижче 20°C .

Після 4 годин охолодження, повільно додавали до суміші 3 г перманганата калію (KMnO_4). При цьому не вимикали магнітну мішалку і не виймали колбу з льодяної ванни. Оскільки колба була добре охолоджена, то під час взаємодії компонентів з перманганатом калію (KMnO_4) не спостерігалось сильної реакції, але відчутно було незначне нагрівання колби. Після

На рис.1 наведена схема отримання оксиду графену.

2.2. Оксид графіту отримували за допомогою модифікованого методу Хамера. При окисненні графіту можна виділити 3 стадії:

- 1) інтеркаляції і окиснення природного графіту сполукою $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ за допомогою сірчаної кислоти [14];
- 2) подальше окиснення продукту в результаті взаємодії з KMnO_4 у H_2SO_4 ;
- 3) взаємодія отриманого розчину з H_2O_2 (30% водний розчин) [3, 15].

додавання перманганату калію (рис.2,а), виймали колбу з льодяної ванни і нагрівали її спочатку до кімнатної температури, а потім впродовж 2 годин підтримували температуру колби близько 35°C . При цьому постійно перемішували суміш. Отриманий розчин перетворюється у пастовидну суміш (рис.2, б). Додавали 46 мл дистильованої води ($\text{D}_2\text{H}_2\text{O}$), і переливали розчин у колбу об'ємом 500 мл. Нагрівали до температури в колбі в межах $90-95^\circ\text{C}$ при неперервному перемішуванні. Нагрівання відбувалося впродовж 2 годин і при цьому важливою умовою є недопускання кипіння розчину. Вже після першої години нагрівання стають помітні зміни в кольорі.

Після цього вимикали нагрівач і опускали колбу в холодну воду, для охолодження суміші до кімнатної температури. Додавали 100 мл дистильованої води, і 1 годину постійно перемішували компоненти. Останній компонент синтезу - 10 мл перекису водню (H_2O_2) додавали в розчин, при цьому змінювався колір на темно-жовтий. У розчині були видні дрібні частинки блискучого порошку (рис.2,в). Утворений розчин мав кислий рівень ($\text{pH}=0,4$). Промивали розчин до нейтрального значення $\text{pH}=7,0$ у дистильованій воді до утворення окисленого графіту, що містить у міжкристалічному просторі залишки

кислоти, воду і поверхневі функціональні групи. Отриманий осад висушували на повітрі за температури 60°C до утворення плівки (рис.2. г).

Виявилося, що кінцевий матеріал (плівка) не розчиняється ні в чому, окрім води [14-20].

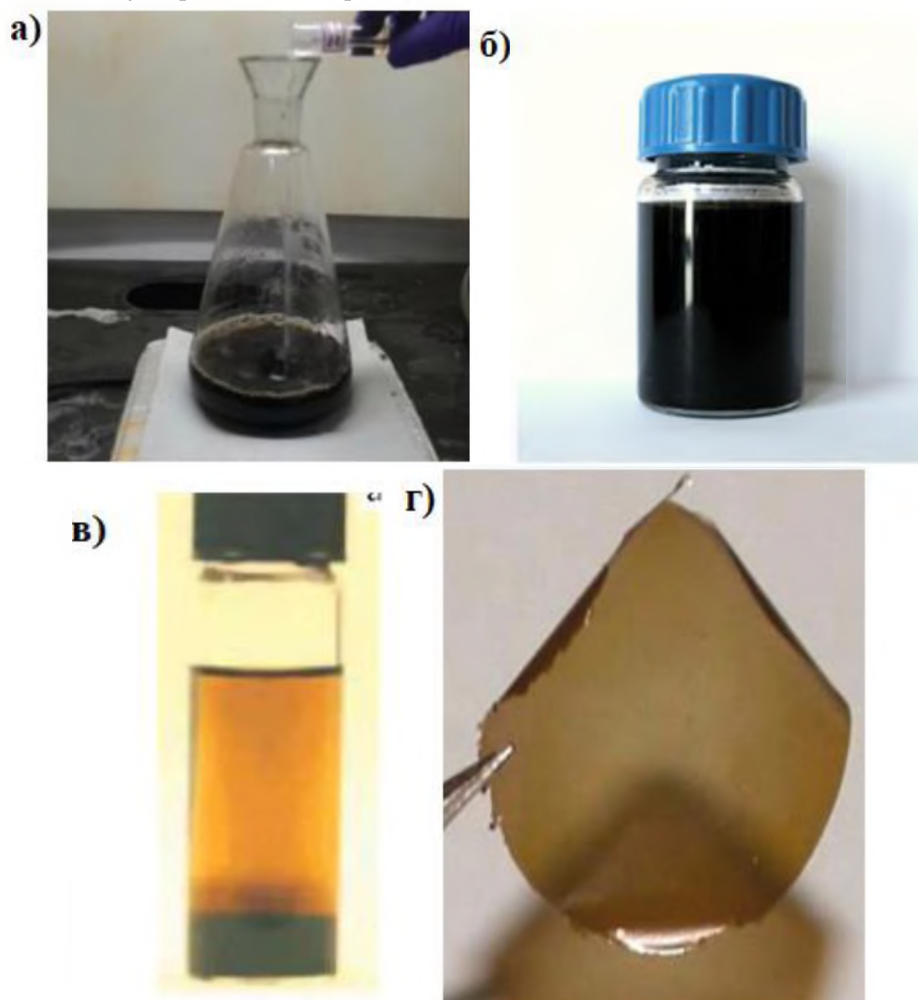


Рис.2 Стадії проведення експерименту (а, б, в, г)

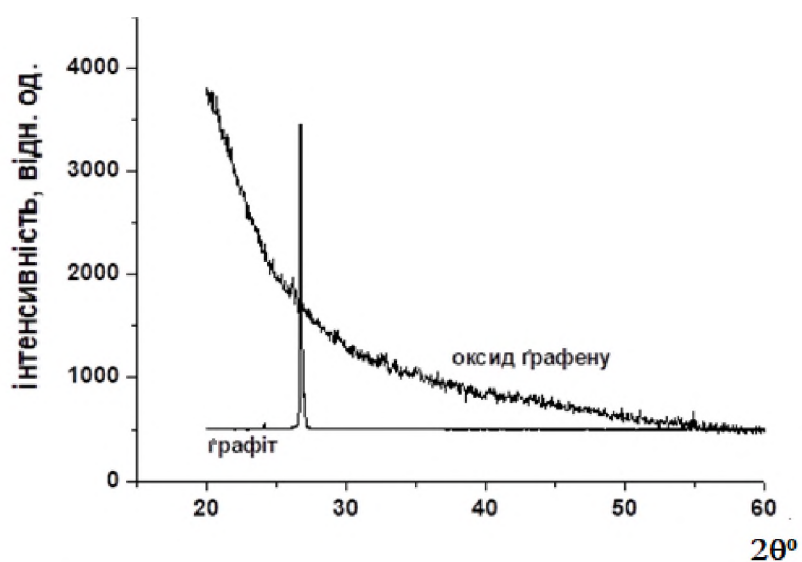


Рис. 3. Дифрактограма X-променевої аналізи синтезованого оксиду графену.

2.5. Для дослідження структурних властивостей отриманого матеріалу проводили дифрактометричні випробування. X-променевою аналізою встановлено, що синтезований матеріал є Пуллой-аморфним (рис.3), що є підтвердженням отримання оксиду графену. Так як графіт, який ми використовували як прекурсор у синтезі, немає кристалічної структури, тому й отриманий на його основі оксид графену є аморфним матеріалом.

2.6. Основний продукт поглинає вологу з навколишнього повітря пропорційно його вологості. Повне видалення води з кінцевого продукту неможливе, так як нагрівання за 60-80 °С призводить до частинного розкладання і деградації матеріалу. Подібно воді, оксид графену також легко включає інші полярні розчинники,

наприклад, спирти[21-25]. Роздільність шарів оксиду графену пропорційно розміру молекули спирту, додаткові моношари вставляються в структуру за високому тиску. Передбачувані водневі містки між оксидом графіту і водою[26].

2.7. Оптичні властивості отриманої плівки оксиду графену досліджували за допомогою оптичної спектроскопії у видимому діапазоні довжин хвиль. Оптичний спектр пропускання плівки оксиду графену представлено на рис.4. Встановлено присутність декількох локальних мінімумів, що відповідають поглинанню світла при цих довжинах хвиль молекулярними зв'язками, які виникають при формуванні плівки оксиду графену.

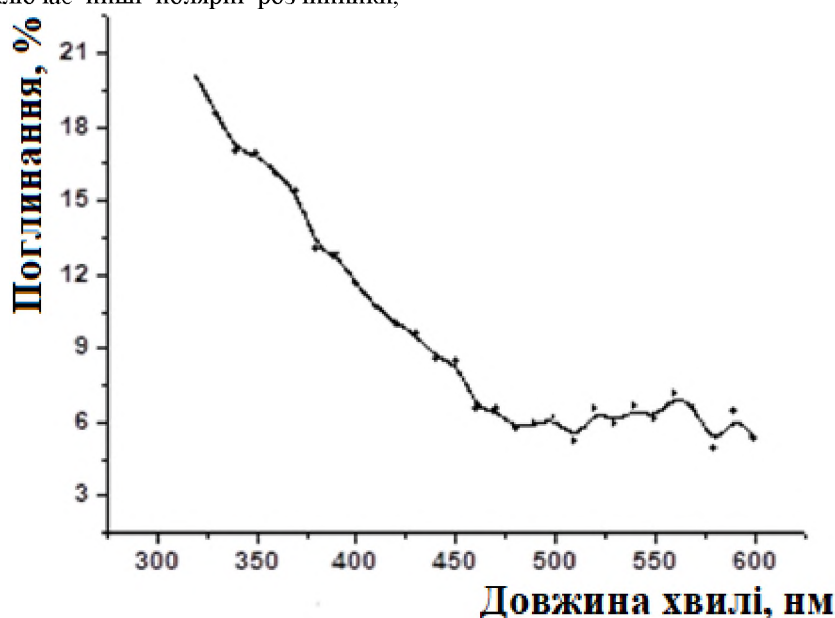


Рис.4. Оптичний спектр пропускання синтезованого оксиду графену.

Висновки

1. Таким чином, у результаті проведених досліджень було синтезовано відновлений оксид графену модифікованим методом Хамера та досліджено його структурні властивості. Вивчено вплив різних чинників (вихідних прекурсорів, температури, речовини окиснювача, умов синтезу) на процес отримання оксиду графену за видозміненої методики Хамера. Знайдені умови для отримання оксиду графену у великих кількостях (у грамах).

2. Графенові матеріали надзвичайно перспективні для цілого ряду застосувань, починаючи від електроніки і закінчуючи медициною[27-30]. Серед різних застосувань оксидів графену біомедичні та фармакологічні викликають найбільший інтерес, оскільки ці

речовини мають унікальні властивості селективності. Біомедичне застосування сорбційних властивостей оксидів графену - відносно нова галузь зі значним потенціалом.

3. За останнє десятиліття була проведена велика робота по вивченню можливостей використання оксиду графену, починаючи від поставки ліків/генів, біологічного виявлення і візуалізації, антибактеріальних матеріалів, до використання як біосумісного каркаса для клітинної культури[31].

4. Одним з методів використання оксиду графену є діагностика пістрижкових (ракових) захворювань.

5. Унікальні електричні та оптичні властивості графену надають можливість виявлення біомаркерів (індикаторів пістрижкових

захворювань на ранніх стадіях). Сенсори даного типу були розроблені на основі оксиду графену, який виступав як сорбент біологічних об'єктів. Створювані на базі графену електрохімічні пристрої [32] здатні як детектувати біомаркери, так і допомагати вивчати процеси утворення активних форм окиснених біоматеріалів в живих клітинах.

6. Другою важливою ділянкою застосування оксиду графену є система адресної доставки діагностичних і лікарських засобів. Вже здійснено успішне використання оксиду графену з магнітними наночастинками, які виступають у якості носіїв протипістрякових препаратів, нуклеотидів, пептидів, флуоресцентних агентів. Найбільш актуальним є напрямок пов'язаний з адресною доставкою короткоживучих радіонуклідів до пістрякових клітин, що дозволяє проводити ефективне, спрямоване, цілісне, безопераційне лікування багатьох видів пістряку. Радіонукліди, які передбачається використовувати в сорбційному стані на носіях з оксиду графену, - це короткоживучі альфа-(^{213}Bi , ^{225}Ac), бета-(^{90}Y , ^{177}Lu) або оже-(^{67}Ga) випромінювачі [33].

7. Третім напрямком є створення сорбційних біодатчиків на основі оксиду графену. Зокрема, доведено вибіркоче виявлення ДНК у розчинах. Також, було доведено, що оксид графену може доставити абсорбовані олігонуклеотиди в живі клітини для виявлення біомолекул. Нарешті, оксиди графену здатні прискорити ріст, диференціювання і проліферацію стовбурових клітин і, отже, дуже перспективні у тканинній інженерії, регенеративній медицині та інших біомедичних галузях. Систематичне вивчення дуже бажано для вирішення проблем безпеки перед практичним застосуванням графену в біомедицині. Дослідження біомедичних застосувань графену розширюються, але поки в основному знаходяться на початковій стадії. Успіхи в цій галузі медицини захоплюють та обнадійливі, але існує і низка проблем, які ще повинні бути розв'язані. Однією з них є детальне розуміння взаємодії "графен - жива тканина", особливо механізму клітинного поглинання. Такі знання сприяють розвитку ефективної доставки ліків, біодатчиків та інших застосувань.

8. Оксиди графену, а також композити на їх основі - перспективні матеріали для контролю навколишнього середовища (в першу чергу це стосується промислових відходів). В окремих випадках їх можна розглядати як резервний матеріал для екстреного знезараження повітря і рідких відходів [34]. Оксигеновмісні функціональні групи на краях і в площині оксидів графену здатні як до ковалентним, так і до нековалентним взаємодіям з різними молекулами. Більше того, значна за величиною питома поверхня оксидів графену дозволяє поглинати істотні кількості йонів важких металів і органічних спечій. Завдяки особливостям

приповерхневої хемії та різних типів архітектури конгломератів на основі оксидів графену, є численні можливості для селективних каталітичних процесів розкладання шкідливих газів на безпечні похідні. У цьому оксиди графену на порядки перевершують активоване вугілля (у цьому добре себе зарекомендувавши під час двох світових воєн в індивідуальних протигазах і фільтрах притулків).

9. В екологічному аспекті оксиди графену в найближчій перспективі актуальні як прекоцентранти трасової кількості (preconcentration of trace amounts) шкідливих речовин - у цілях моніторингу всіх компонентів доквілля [35-37]. Благо великих кількостей сорбенту і не буде потрібно, оскільки останнім часом гарний розвиток отримав метод так званої дисперсивної мікроекстракції твердою фазою [dispersive micro-solid phase extraction (DMSPE)]. Цей метод дозволить надійно визначати йони важких металів у концентрації близько 1 нанограма / мілілітр. Зокрема, у США ведуться розробки способів контролю води на полях видобутку нафти і газу в умовах високого ступеня зневоднення, у тому числі при видобутку вуглеводнів технологіями гідророзриву пласта (так звані сланцева нафта і газ). Запобігання попадання цих шкідливих речовин у системи цивільного водопостачання - важливе гуманітарне завдання.

10. По-перше, дезактивація заражених природних і техногенних об'єктів. Виділення довгоживучих радіонуклідів з водних розчинів різного складу є важливою проблемою, вирішення якої необхідно як для розвитку технологій замкнутого ядерного паливного циклу, так і реабілітації території, забруднених радіонуклідами. Для України, Японії тощо гостро стоять проблеми очищення забруднених ґрунтів, підземних і поверхневих вод та інших об'єктів від радіонуклідів (радіонукліди на забрудненій Чорнобильській зоні та на занедбаних уранових родовищах, хвостосховищах, тощо). Відповідні технології повинні бути відносно дешеві, ефективні і дозволяти переробляти значні обсяги водних розчинів. У пошуку таких технологій вивчають різні матеріали, здатні ефективно сорбувати радіонукліди. У тому числі наночастинки оксидів металів та вуглецеві наноматеріали, звичайно й оксид графену, вуглецеві нанотрубки, наноалмази, тощо.

11. По-друге, це суперчисті приміщення для виробництва електронних компонентів спеціального призначення. Вони вимагають мінімальної наявності домішок у виробничих зонах, а це можуть забезпечити фільтри на основі оксидів графену [38].

12. По-третє, тонкі хемічні технології можуть зробити прорив за рахунок унікальних сорбційних властивостей оксидів графену.

Зокрема, мова йде про нові технології вилучення рідкісних, розсіяних і радіоактивних металів, а також золота з бідних джерел, у тому числі техногенних. Прикладом успішних розробок, закріплених міжнародним патентом, є сорбенти на основі оксидів графену. На думку авторів винаходу, такі сорбенти можна використовувати в принципово новій технології очищення рідин, наприклад, в атомних електростанціях. Основні її переваги - простота і висока ефективність. Зокрема, при сорбції йонів урану оксиди графену набагато перевершують найближчі аналоги [39].

13. Вимірювання оптичних властивостей графенових матеріалів шляхом контролювання оксиду графену допоможе знайти точний контроль

межі між p- і p-ділянками графену. Це приведе до конструювання в графені електронно-діркового p-p-переходу. Очікуємо, що в майбутньому традиційні кремнієві транзистори будуть замінені такими матеріалами. Крім самого транзистора, реалізуватимуться різні види інтегральних схем. І це можна вважати прогресом, так як дослідження графену як основи для електронних приладів знаходиться на ранній стадії розвитку.

14. Графен, оксиди і графенів, як аналог графіту відноситься до твердих мастильних матеріалів, але антифрикційні властивості графенів та оксидів графену не досліджені.

Використані літературні джерела інформації

- 1. Sun Z., James D.K., Tour J.M.** Graphene chemistry: synthesis and manipulation // *Phys. Chem. Lett.* – 2011. – Vol 1. – P. 2425–2432.
- 2. Georgakilas V., Otyepka M., Bourlinos A.B.** et al. Functionalization of graphene: covalent and non-covalent approaches, derivatives and applications // *Chem. Rev.* – 2012. – Vol. 112. – P. 6156–6214.
- 3. Грайфер Е.Д.** Графен: химические подходы к синтезу и модифицированию/ Е. Д. Грайфер, В. Г. Макотченко, А.С. Назаров и др. // *Успехи химии.* – 2011. – Т. 80, № 8. – С. 784–804.
- 4. Елецкий А.В.** Графен: методы получения и теплофизические свойства/ А. В. Елецкий, И.М. Искандарова, А.А. Книжник // *Успехи физ. наук.* – 2011. – Т. 181, № 3. – С. 233–268.
- 5. Novoselov K.S.** Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene/ K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov. // *Nature.* – 2005. – Vol. 438, N 7065. – P. 197–200.
- 6. Novoselov K.S.** Electric field effect in atomically thin carbon films/ K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov. // *Science.* – 2004. – Vol. 306, N 5696. – P. 666–669.
- 7. Novoselov K.S** A roadmap for graphene/ K. S. Novoselov, V.I. Falko, L. Colombo // *Nature.* – 2012. – Vol. 490, N 7419. – P. 92–200.
- 8. Singh V.** Graphene based materials: past, present and future/ V. Singh, D. Joung., L. Zhai // *Progress in Materials Science.* – 2011. – Vol. 56. – P. 1178–1271.
- 9. Batzill M.** The surface science of graphene: metal interfaces, CVD synthesis, nanoribbons, chemical modifications, and defects // *Surface Science Reports.* – 2012. – Vol. 67. – P. 83–115.
- 10. Weiss N.O.** Graphene: an emerging electronic material/ N. O. Weiss, H. Zhou, L. Liao // *Adv. Mater.* – 2012. – Vol. 24, N 43. – P. 5782–5825.
- 11. Сорокин П.Б.** Полупроводниковые наноструктуры на основе графена/ П. Б. Сорокин, Л. А. Чернозатонский // *Успехи физ. наук.* – 2013. – Т. 183, № 2. – С. 113–132.
- 12. Huang C.** Graphene based catalysts/ C. Huang, C. Li, G. Shi // *Energy Environ. Sci.* – 2012. – Vol. 5, N 10. – P. 8848–8868.
- 13. Liu Y.** Biological and chemical sensors based on graphene materials/ Y. Liu, X. Dong, P. Chen // *Chem. Soc. Rev.* – 2012. – Vol. 41, N 6. – P. 2283–2307.
- 14. Sun Y.** Graphene based new energy materials/ Y. Sun, Q. Wu, G. Shi // *Energy Environ. Sci.* – 2011. – Vol. 4, N 4. – P. 1113–1132.
- 15. Wassei J.K.** Oh, the places you'll go with graphene/ J. K. Wassei, R. B.Kaner // *Acc. Chem. Res.* – 2013. – Vol. 46, N 10. – P. 2244–2253.
- 16. Barroso-Bujans F.** Kinetic study of the graphite oxide reduction: combined structural and gravimetric experiments under isothermal and nonisothermal conditions/ F. Barroso-Bujans, A. Alegria, J. Colmenero // *J. Phys. Chem. C.* – 2010. – Vol. 114. – P. 21645–21651
- 17. Bagri A.** Structural evolution during the reduction of chemically derived graphene oxide/A. Bagri, C. Mattevi, M. Acik// *Nature Chemistry.* – 2010. – Vol. 2. – P. 581–587.
- 18. Segal M.** Selling graphene by the ton // *Nat. Nanotechnol.* – 2009. – Vol. 4, N 10. – P. 612–614.
- 19. Low F.W.** Easy preparation of ultrathin reduced graphene oxide sheets at a high stirring speed/ F. Low, C. Lain, S. B/Hamid // *Ceramics International.* – 2015. – Vol. 41. – P. 5798–5806.
- 20. Tung V.C.** High-throughput solution processing of large-scale graphene/ V. C. Tung, M. Allen, Y. Yang, R. Kaner // *Nat. Nanotechnol.* – 2009. – Vol. 4. – P. 25–29.

21. **Liu W.** Synthesis and characterization of graphene and carbon nanotubes: A review on the past and recent developments// *J. Ind. Eng. Chem.* – 2014. – Vol. 20. – P. 1171–1185.
22. **Boehm H.-P.** Citation errors concerning the first report on exfoliated graphite // *Carbon.* – 2007. – Vol. 45. – P. 1381–1383.
23. **Schafheutl C.** Ueber die Verbindungen des Kohlenstoffes mit Silicium, Eisen und anderen Metallen, welche die verschiedenen Gallungen von Roheisen, Stahl und Schmiedeeisen bilden // *J. Prakt. Chem.* – 1840. – Vol. 21. – P. 29–157.
24. **Schafheutl C.** On the combinations of carbon with silicon and iron, and other metals, forming the different species of cast iron, steel, and malleable iron // *Phil. Mag.* – 1840. – Vol. 16. – P. 570–590.
25. **Liu Y.** Biocompatible graphene oxide-based glucose biosensors // *Langmuir.* – 2010. – Vol. 26. – P. 6158–6160.
26. **Liu Y.** Investigation on fluorescence quenching of dyes by graphite oxide and graphene // *Appl. Surf. Sci.* – 2011. – V. 257. – P. 5513–5518.
27. **Pham T.A.** A simple approach for immobilization of gold nanoparticles on graphene oxide sheets by covalent bonding/ T. Pham, B. Choi, K. Lim, Y. Jeong // *Appl. Surf. Sci.* – 2011. – V. 257. – P. 3350–3357.
28. **Geim A.K.** The rise of graphene/A. Geim, K. Novoselov // *Nat. Mater.* – 2007. – Vol. 6. – P. 183–191.
29. **Park S.** Chemical methods for the production of graphenes // *Nat. Nanotechnol.* – 2009. – Vol. 4. – P. 217–224.
30. **Саранчук В.І.** Основи хімії і фізики горючих копалин. / В. Саранчук, М. Ільяшов, В. Ошовський, В. Білецький// Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. –640
31. **Wissler M.** Graphite and carbon powders for electrochemical applications // *J. Power Sources.* – 2006. – V. 156, Iss. 2. – P. 142–150.
32. **U.S. Patent 4094951.** Composites of Oxidized Graphite Material and Expanded Graphite Material / T. Ishikawa, T. Kanemaru, Teranishi H., Onishi K. 1978.
33. **Колбасов Г.Я.** Синтез восстановленного оксида графена из многослойных углеродных нанотрубок и его электрокаталитические свойства/ Г. Я. Колбасов, М. Данилов, И. Слободянюк, И. Русецкий // *Укр. хим. журн.* – 2014. – Т. 80, № 7. – С. 3–22.
34. **Мурадян В.Е.** Превращение окиси графита в условиях ионного гидрирования // *Журн. общ. химии.* – 1991. – Т. 61, Вып. 12. – С. 2626–2629.
35. **Li J.; Zeng X.;** The Preparation of Graphene Oxide and Its Derivatives and Their Application in Bio-Tribological Systems // *Lubricants.* – 2014. – Vol. 2. – P. 137–161.
36. **Schniepp H.C.** Functionalized single graphene sheets derived from splitting graphite oxide // *J. Phys. Chem. B.* – 2006. – Vol. 110. – P. 8535–8539.
37. **Gomez-Navarro C.** Electronic transport properties of individual chemically reduced graphene oxide sheets/ C. Gomez-Navarro, R. Weitz, A. Bittner // *Nano. Lett.* – 2007. – V. 7, N 11. – P. 3499–3503.
38. **Eda G.** Large-area ultrathin films of reduced graphene oxide as a transparent and flexible electronic material/ G. Eda, G. Fanchini, M. Chhowalla// *Nature Nanotechnol.* – 2008. – Vol. 3. – P. 270–274.
39. **Stankovich S.** Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide/ S. Stankovich, D. Dikin, R. Piner // *Carbon.* – 2007. – Vol. 45. – P. 1558–1565.

Андрусинин Ю. І. – аспірантка 1-го року навчання кафедри хімії Прикарпатського національного університету ім. В. Стефаника;

Сіренко Г. О. – заслужений діяч науки і техніки України, академік Академії технологічних наук України, доктор технічних наук, професор кафедри хімії Прикарпатського національного університету ім. В. Стефаника.