ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.91

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.08>

Г. Рудько, д-р геол.-мінерал. наук, геогр. наук, техн. наук, проф.,
голова Державної комісії України по запасах корисних копалин,
E-mail: office@dkz.gov.ua,
вул. Ген. Алмазова (Кутузова), 18/7, кімн. 816, м. Київ, 01133, Україна

ГЕОЛОГІЯ ГРАФІТОВИХ РОДОВИЩ УКРАЇНИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИДОБУТКУ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол.-мінерал. наук, проф. В.М. Загнітком)

Видобуток графіту та його використання в різноманітних галузях виробництва і техніки відіграє значну роль в економіці багатьох країн світу. Відмінні характеристики графіту, який є однією із поширених у природі форм вуглецю (хороша електропровідність, низька твердість, стійкість до нагрівання і до впливу агресивних середовищ), широко використовуються вченими в різних наукових розробках.

Після того, як у 2004 р. у журналі *Science* британськими дослідниками російського походження з Манчестерського університету А. Геймом і К. Новосьоловим була опублікована стаття про властивості першого дослідженого двовимірного кристалу графену, попит на графітові руди лише зростає і за деякими прогнозами до 2026 р. становитиме понад 400 млн дол США.

Лускатий природний графіт можна застосовувати в нових технологіях, таких як графен, що сьогодні використовується в різних наукових розробках, а також під час виробництва літієво-іонних батарей, у паливних елементах, в установках з виробництва ядерної та сонячної енергії тощо.

Коротко наведено геологічні умови Заваллівського графітового родовища, яке нині є основним джерелом графіту в Україні, та окреслено перспективи виявлених ділянок, що можуть стати додатковим резервом графітових руд.

Значні прогнозні ресурси графіту нових родовищ, виявлених останнім часом на території України (Буртинське, Балахівське, Сачкінське-Троїцьке, низка нових ділянок у районі Завалля), дають можливість не тільки підтримувати на належному рівні, а й за необхідності значно розширити існуючу мінерально-сировинну базу, завдяки чому Україна може стати одним із найбільших у світі постачальників графітової продукції.

Графен має величезну механічну міцність і рекордно високу теплопровідність. Надзвичайно висока рухливість електронів у ньому робить графен перспективним матеріалом для використання в самих різних областях, зокрема, як майбутню основу наноелектроніки та можливу заміну кремнію в інтегральних мікросхемах. Наведено результати з використання унікальних властивостей графену.

Ключові слова: графіт, графітові родовища, Заваллівське родовище, графен.

Постановка проблеми. Графіт дуже широко використовується в різноманітних галузях промисловості, зокрема є необхідною сировиною (допоміжним матеріалом) у виробництві найрізноманітнішої кінцевої продукції: штучних алмазів, лужних акумуляторів і батарей, у паливних елементах хімічних джерел струму, у виробництві безшовних труб, у металообробці й куванні, для штампування та прокатки металевих виробів, у гальмівних колодках й інших фрикційних матеріалах, у графітовій фользі, прокладках і ущільнювачах, в олівцях, у виробництві термостійкої кераміки і вогнетривкої продукції, у спеціальній термостійкій гумі, для екранування у виробництві силових кабелів і зв'язку, в антикорозійних покриттях і фарбах, як добавка до розчинів під час буріння у процесі нафтогазовидобутку.

Після того, як у 2004 р. в журналі *Science* британськими дослідниками російського походження з Манчестерського університету Андрієм Геймом і Костянтином Новосьоловим була опублікована стаття про властивості першого дослідженого двовимірного кристала графену, учені всього світу вперше почули про новий матеріал, а його відкривачі в 2010 р. отримали за свій винахід Нобелівську премію. Це відкриття дало поштовх для розвитку численних наукових досліджень у багатьох галузях і сприяло виявленню нових і переорієнтації на нові напрями вже відкритих графітових родовищ по всьому світу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання промислових типів руд графітових родовищ Українського щита (УЩ) у науковій літературі розглядалися А.Д. Додатком і Н.Н. Янгічером, а основні дослідження в галузі збагачення руд були проведені В.Б. Чижевським, М.В. Бондаренко, Н.С. Власовою та ін. Розробка схем і режимів збагачення графітових руд проводилася Інститутом мінеральних ресурсів

(м. Сімферополь). Технологічні дослідження збагачуваності різних типів графітових руд були виконані Заваллівським гірничо-збагачувальним комбінатом (ГЗК).

Установлено, що промислове значення руд Заваллівського родовища є вищим, ніж решти об'єктів, оскільки їхнє збагачення дозволяє отримати майже всі товарні марки графіту. Якщо враховувати, що найбільш цінним є графіт тигельний (ГТ), то за цим показником Заваллівське родовище перевищує Буртинське майже в чотири рази (Лижаченко та ін., 2013).

Значний вплив на галузь спричинили кризові явища у світовій економіці, проте на сьогодні спостерігається ремісія графітовидобувної галузі багатьох країн світу і відновлення потужностей промислових секторів, що використовують графіт. Запаси та ресурси графіту в Україні залишаються традиційно значними, вони здатні цілком забезпечити потреби вітчизняної промисловості та зайняти провідне місце на світовому ринку (Загнітко та Лижаченко, 2012).

Розглянуто методи збагачення графітових руд в Україні залежно від ступеня їхніх фізико-хімічних змін, зроблено порівняльну промислову оцінку родовищ і визначено найперспективніші для освоєння об'єкти, особливості кон'юнктури ринку графіту, що передбачає аналіз динаміки видобутку, виробництва, споживання мінеральної сировини в Україні та світі (Кропівний та ін., 2019).

Виклад основного матеріалу. Родовища кристалічного графіту в межах Українського щита (УЩ) утворюють велику графітоносну провінцію, в якій виділяють чотири графітоносні райони: Бердичівський, Побузький, Криворізький і Приазовський (Яценко, 2008). Усього на території провінції виявлено близько 100 родовищ і проявів графіту. Усі вони належать до метаморфічного типу, приуроченого до порід архею та нижнього протерозою. Глибина залягання графітових

руд – від 10 до 80 м. Поклади графіту утворюють пластові та лінзоподібні тіла потужністю до 300 м. Довжина рудних тіл – від 5 до 1500 м, інколи 3,5–5,0 км. Графіт лускуватий, із вмістом у рудах 2,5–20,0 %.

До Державного балансу запасів корисних копалин належать шість родовищ графіту (*Державний баланс запасів України, 2011*) (рис. 1). Розробляється одне родовище – Заваллівське, ділянка Південно-східна,

решта п'ять родовищ (Буртинське, Балахівське, Петрівське, Троїцьке, Маріупольське) не розробляються. На базі Заваллівського родовища діє однойменний графітовий комбінат. При проектній потужності комбінату 800 тис. т руди забезпеченість загалом розвіданими запасами становить понад 100 років, а запасами Південно-східної ділянки в межах проектних контурів розробки – 11 років.

Рис. 1. Мінерально-сировинна база графіту України

Заваллівське родовище метаморфічного типу, пов'язане з біотит-графітовими гнейсами хашувато-заваллівської світи бузької серії (неоархей), розташований на лівому березі мальовничої річки Південний Буг, за 1 км на схід від селища Завалля.

Родовище було відкрито ще на початку 20-х рр. минулого століття. Розташовано воно в густонаселеній центральній частині України. Загальна площа родовища, яке межує з Одеською та Кіровоградською областями, становить близько 50 км². Основна частина

Заваллівського родовища та виробництво графіту розмістилися в Гайворонському районі Кіровоградської області.

Рудоносні тіла являють собою крутоспадні пласти субширотного простягання. Потужність окремих тіл – від 15 до 400 м, протяжність – 3,0–4,8 км. Розробляють переважно руди з каолінізованої кори вивітрювання гнейсів – біотитів, амфібол-біотитів, біотит-хлоритів, хлорит-серицитів та ін. Графіт родовища – кристалічний, лускуватий (2–4 мм), із вмістом у руді 6–14 % (у середньому 6,5 %) (рис. 2).

Рис. 2. Схематична карта і розріз Заваллівського родовища графіту:

- 1 – граніти бузького комплексу; 2 – мігматити; 3 – чарнокіти; 4 – гнейси піроксенові; 5 – гнейси амфіболові;
6 – гнейси гранат-біотитові дністровсько-бузької серії; 7–13 – хашувато-заваллівська світа (7 – сланці карбонатні);
8 – кальцифіри, мармури; 9 – скарноїди; 10 – кварцити залістисті; 11 – кварцити безрудні; 12 – гнейси біотит-гранатові;
13 – гнейси біотит-графітові (руда); 14–15 – кошаро-олександрівська світа
(14 – гнейси силіманітові; 15 – кварцити); 16 – амфіболіти та габро-амфіболіти; 17 – розломи; 18 – границі ділянок;
19 – свердловини (а – на карті; б – на розрізі); 20 – лінія розрізу

Підтверджені запаси руди – 96,6 млн т, у перерахунок на рядовий графіт – 6,1 млн т. Супутньою корисною копалиною є абразивна сировина (гранат), запаси якої оцінюють у 20,3 млн т руди або 9,7 тис. т мінералу. Родовище розробляють відкритим способом із попереднім роздрібненням свердловинними зарядами. Річний обсяг видобутку руди – близько 40 тис. т; її перероблення з випуском графітового концентрату здійснюють на збагачувальній фабриці ТОВ "Заваллівський графітовий комбінат" (Гурський та ін., 2006).

За даними Industrial Minerals (Велика Британія), ТОВ "Заваллівський графіт" входить до ТОП-10 у світі серед виробників природного графіту. Підприємство виготовляє більше 25 основних марок графіту із вмістом вуглецю від 85 до 99,5 % і розміром від 10 до 200 мкм, також колоїдно-графітові препарати і мастильно-охолоджувальні рідини на основі графіту (ТОВ "Заваллівський графіт", н.д.).

Продукція, яка пропонується Заваллівським графітовим комбінатом, відповідає вимогам державних стандартів і технічних умов і експортується в багато країн Європейського союзу (Німеччина, Франція, Бельгія, Велика Британія, Туреччина, Іспанія, Італія, Польща, Швейцарія, Чеська республіка, Румунія, Словаччина, Сербія, Болгарія, Греція, Норвегія), Азії (Японія, Корея), у країни СНД (Білорусь, Молдова), а також у США.

Технологічна лінія з виробництва графіту являє собою ланцюжок послідовно зв'язаного технологічного обладнання, апаратів і механізмів, що забезпечують процес від дроблення руди до фасування готової продукції та складування (укладання) хвостів (відходів виробництва) до хвостосховища. Остання розвідка і переоцінка запасів графіту на Заваллівському родовищі виконана у 1971–1982 рр. (Гурський та ін., 2006).

Заваллівський графіт воістину унікальний, оскільки має практично ідеальну кристалічну структуру і містить мінімальну кількість домішок, склад яких дозволяє легко видалити їх із руди. Завдяки тому, що в корі вивітрювання лусочки графіту звільнені від зрощення з іншими мінералами (розкриті), ці руди (так звані м'які) ще легше збагачуються, тому являють собою першочерговий об'єкт промислової розробки.

Розробка родовища ведеться відкритим, кар'єрним способом (глибиною 250 м). Видобувається руда – каолінізовані гнейси, в яких, крім графіту, містяться також: силіманіт, кварц, піроксен, хлорид, біотит і гранат. Пластоподібні поклади графітовмісних гнейсів – рудні смуги, що чергуються з безрудними породами (рис. 3)). Виділяються п'ять рудних смуг, шириною від 1,0 м до 80 м. Середній вміст графіту коливається залежно від ділянки родовища від 6,7 до 10,1 %. Заваллівський комбінат з виробництва продукції з графіту повністю забезпечений графітовими рудами родовища.

Пухкі й тверді руди родовища збагачуються флотацією з одержанням концентрату, який містить 86–97 % графіту високої якості й має зольність не вище 10–13 %.

Сьогодні ТОВ "Заваллівський графіт" виробляє понад 20 найменувань різних марок графіту та колоїдно-графітові препарати. Підприємство розвивається з кожним днем, обсяги виробництва постійно зростають, удосконалюється обладнання і технологічні процеси, розширюється номенклатура продукції (табл. 1).

Останнім часом на території України виявлено нові родовища зі значними прогнозними ресурсами графіту – Буртинське, Балахівське, Сачкінсько-Троїцьке, низка нових ділянок у районі Завалля (Іванців, 1972). Їхні запаси дають можливість не тільки підтримувати на належному рівні, а й за необхідності значно розширити

існуючу мінерально-сировинну базу, завдяки чому Україна може стати одним із найбільших у світі постачальників графітової продукції.

Рис. 3. Діючий кар'єр Заваллівського родовища (ТОВ "Заваллівський графіт", н.д.)

Нещодавно розвідані Балахівське і Буртинське графітові родовища значно перспективніші від раніше розвіданих Троїцького, Петрівського, Маріупольського родовищ, а за основними геолого-промисловими показниками відповідають уже освоєному Заваллівському родовищу.

Буртинське родовище розташовано в Полонському районі Хмельницької області, північніше с. Буртин. Графітовмісні породи Буртинського родовища були виявлені в 1953–1954 рр., у подальшому вивчалися під час проведення геологічної зйомки, глибинного картування. У 1981–1984 рр. Житомирською геологорозвідувальною експедицією об'єднання "Північчугреологія" були проведені загальні пошуки графіту в Північно-західній частині Українського щита. Опішковано дев'ять ділянок, найперспективнішою з яких виявилася Буртинська ділянка з прогнозними ресурсами графітової руди 423,2 млн т, графіту – 25 млн т. Протягом 1984–1988 рр. тими ж силами проведено пошуково-оцінювальні роботи на Буртинському родовищі графіту. Виявлено запаси і ресурси графітової руди за категоріями С2 і Р1 у кількості 350 млн т. У межах родовища виділено й оцінено чотири перспективні ділянки: Городнявська, Матроська, Хмельівська, Лісова. Мінеральний склад порід і руд досить однорідний: польовий шпат, кварц, графіт, біотит, серицит, каолінит, нонтроніт, монтморилоніт, хлорит, гідроксиди, гідроокисли заліза та акцесорні – сульфід, апатит, гранат, ільменіт, циркон, монацит. Графіт у рудах представлений у вигляді тонкого вкраплення, утворює лускуваті агрегати і прошарки за гнейсуватістю. У гнейсах графіт загалом розповсюджений досить рівномірно і лише інколи зустрічається у вигляді збагачених прошарків і гнізд. Шкідливі домішки в графіті відсутні або в межах допусків. Вміст графіту в усіх природних типах графітових руд змінюється від 4,4 до 11,9 %.

Рудний поклад *Хмельівської ділянки* Буртинського родовища приурочений до північно-східного крила великої Шепетівської антикліналі Волинського блока Українського щита. Займає площу 143,3 га. Основними графітовмісними породами є графіт-біотитові гнейси і мігматити. Обсяг безрудних тіл у межах рудного покладу становить 12 %. У рудній товщі виділяються три зони (зверху вниз): 1) зона повної каолінізації представлена пухкими рудами, розвиненими по всій площі родовища; потужність змінюється від 1,5 до 30 м (середня – 10 м); являють собою первинні (структурні) каоліни; 2) зона часткової каолінізації, дезінтеграції та

підвищеної тріщинуватості представлена напівпухкими рудами – сильно тріщинуватими породами і рудами, які поступово переходять у щільні породи і руди; потужність зони дезінтеграції 10–75 м (середня – 50 м);

3) щільні руди і вмісні породи, представлені непорушними вивітрюванням гнейсами і мігматитами графіт-біотитового складу. Середній вміст графітового вуглецю по всіх типах руд – 5,76 %.

Таблиця 1

**Основні марки графіту і сфери їхнього застосування від виробника
ТОВ "Заваллівський графіт" (ТОВ "Заваллівський графіт", н.д.)**

Назва графіту	Марка графіту	Сфера застосування
Графіт тигельний	ГТ-1	Виготовлення вогнетривких виробів: плавильні тиглі, склянки, пробки для ковшів, кришок, муфт, форсунок і т. д.
Графіт тигельний очищений	ГТО-94 ГТО-95 ГТО-96	Виготовлення вогнетривких виробів, графітових сальників, прокладок, виробництво окисненого графіту і т. д.
Графіт ливарний	ГЛ-1	Допоміжний матеріал для металообробної, чавуноливарної та сталеливарної промисловості. Ливарні фарби. Під час буріння свердловин у нафтогазовидобувній промисловості
Графіт для виготовлення мастил	П ГС-4	Виготовлення графітових препаратів і паст, змазок, електропровідної гуми, порошу, у порошковій металургії
Графіт елементний	ГЕ-1 ГЕ-2 ГЕ-3 ГЕ-4	Виробництво гальванічних елементів, позитивних електродів, вогнетривких виробів
Графіт елементний очищений	ГЕО-92 ГЕО-94 ГЕО-95 ГЕО-96 ГЕО-97	Виробництво періклазовуглецевих вогнетривів
Графіт олівцевий	ГК-1 ГК-2 ГК-3	Виробництво олівців
Графіт електровугільний	ЕУЗ-Е ЕУЗ-М	Виробництво вугільних електродів для електропечей та електролізерів, електрошток
Графіт акумуляторний	ГАК-1 ГАК-2 ГАК-3	Добавка для виготовлення активних мас акумуляторів і мас для графітованих виробів з кольорових металів
Графіт спеціальний малозольний	ГСМ-2	Виробництво штучних алмазів і високоякісних мастил
Препарати колоїдно-графітові сухі	С-1 С-2	Застосовуються як компоненти для приготування графітових сумішей та технологічних мастил, виготовлення хімічностійких і антикорозійних покриттів які добавки-пластифікатори у процесі таблетування, як компоненти клею для прогумованих тканин, для контактів і резисторів у радіотехніці

Городнявська ділянка Буртинського родовища розташована в Шепетівському районі Хмельницької області, південніше с. Замороження, за 1,0 км на північний схід від околиці с. Городнявка. Найближча залізнична станція розташована за 0,7 км на південний схід від Городнявської ділянки. Площа ділянки становить 66,2 га.

Городнявська ділянка є північно-західною частиною Буртинського родовища, простягається з південного сходу на північний захід на відстань до 1,8 км при ширині 0,3–1,3 км. Рудний поклад приурочений до північно-східного крила великої Шепетівської антиклінали Волинського блока Українського кристалічного щита. Основними графітовмісними породами є графіт-біотитові гнейси і мігматити василівської світи тетерівської серії. Ширина рудного покладу в плані – 400–450 м на флангах, 500–450 м – у центральній частині ділянки, падіння північно-східне під кутом 45–75°. Об'єм безрудних тіл у межах рудного покладу становить 12 %. Рудний поклад простежений до глибини 226 м від денної поверхні.

У 1989–2004 рр. ДРГП "Північгеологія" виконала розвідку Городнявської ділянки Буртинського родовища графіту, за результатами якої ДКЗ України (протокол від 20.12.04 № 915) затверджено балансові запаси графітових руд. Розвідані запаси підготовлені до промислового освоєння.

Запаси графіту Городнявської ділянки Буртинського родовища враховані Державним балансом станом на 01.01.19 становлять: руда (тис. т) – за кат.: В – 28165,3;

С1 – 85225,6; В + С1 – 113390,9; С2 – 16586,7; позабалансові – 9372,6; *графіт* (тис. т) – за кат.: В – 1736; С1 – 4848,7; В + С1 – 6584,7; С2 – 898,9; позабалансові – 275,7. За розрахунками ТЕО постійних кондицій на базі детально розвіданих запасів Городнявської ділянки Буртинського родовища може бути створено потужне підприємство з річною продуктивністю з видобутку і переробки руди в обсязі 1 млн т і випуску графітового концентрату в кількості 55,9 тис. т. Строк забезпечення підприємства запасами – 130 років.

Завдяки високим якісним характеристикам та значним запасам руд Балахівське і Буртинське родовища можуть служити окремими сировинними базами нових гірничодобувних і переробних підприємств.

Крім того, руди з високим вмістом графіту виявлено на Млинківській площі в Кіровоградській області, у Середньому Побужжі виявлено сім перспективних ділянок (Дубинівська, Демов'ярська, Собатинівська, Східно-савранська, Котовська, Південнохашуватська, Шамрівська). Першочерговими завданнями згідно із Загальнодержавною програмою розвитку мінерально-сировинної бази України до 2030 р. є виявлення активних запасів графіту на території Української графітоносною провінції, проведення оцінювальних робіт на вже виявлених ділянках і модернізація виробництва на Заваллівському графітовому комбінаті за рахунок випуску принципово нових дефіцитних виробів із терморозширеного та силіцирувального графіту для різних галузей промисловості, ракетно-космічної техніки тощо.

Відмінні характеристики графіту, який є одним із поширених у природі форм вуглецю (хороша електропровідність, низька твердість, стійкість до нагрівання і до впливу агресивних середовищ), широко використовуються вченими в різних наукових розробках. Графіт являє собою "стопку" із безлічі шарів графену, плоских листів з атомів вуглецю, які накладені один на одний особливим способом і зчеплені силами Ван-дер-Ваальса. За міцністю вони значно поступаються зв'язкам між атомами всередині листів графену, завдяки чому графіт легко розщеплюється на шари.

Графіт є однією з небагатьох речовин, які можуть протистояти температурі до 1000 °С, і тому буде одним із ключових компонентів нового покоління ядерних реакторів. Лускатий природний графіт можна застосовувати в нових технологіях, таких як графен, що сьогодні

використовується в різних наукових випробуваннях, а також у виробництві літєво-іонних батарей, у паливних елементах, в установках з виробництва ядерної та сонячної енергії.

Графен – двовимірний алотропний модифікація вуглецю, утворена шаром товщиною з один атом, організованим у гексагональну кристалічну решітку. Його можна уявити як площину, зріз графіту, відокремлений від об'ємного кристала (рис. 4).

Графен має величезну механічну міцність і рекордно високу теплопровідність. Надзвичайно висока рухливість електронів у ньому робить графен перспективним матеріалом для використання в самих різних областях, зокрема як майбутню основу наноелектроніки та можливу заміну кремнію в інтегральних мікросхемах.

Рис. 4. Структура графіту (а) і графену (б)

Нині ще тривають численні наукові дослідження властивостей графену, але вже встановлено цілу низку унікальних:

- найміцніший матеріал (у перерахунку на одиницю товщини графен в 200 разів міцніший за сталь);
- графен можна розтягнути на 20 %, перш ніж він порветься, що неможливо навіть уявити для інших кристалів. Такі механічні властивості є результатом надзвичайно малої відстані й сильного зв'язку між атомами вуглецю. Теоретичні розрахунки показують, що "гамак" із графену розміром 1×1 м може витримати вагу до 8 кг;
- чудовий провідник електричного струму і тримає рекорд за параметром рухливості електронів за кімнатної температури (електрони рухаються в графені так, ніби в них немає маси);
- найтонший матеріал (усього лише 5 г графену достатньо, щоб повністю покрити футбольне поле);
- графен є прозорим і хімічно інертним (неабиякий потенціал для використання у найрізноманітніших сферах від електроніки до будівництва);
- за рахунок надзвичайно великої площі поверхні відносно об'єму і за рахунок високої провідності матеріалу продемонстровані на сьогодні сенсори на основі графену мають неперевершену чутливість і короткий час відгуку;
- єдиний досліджений провідник, який дозволяє робити транзистори розміром менше 10 нм і водночас залишатися стабільним за нормальних умов, а отже, у перспективі графен замінить кремній.

Згідно зі звітом, опублікованим у січні 2020 р. компанією Global Market Insights Inc., ринок графену зростає до 406 млн дол США до 2026 р. (Pulidindi and Prakash, 2019), а за деякими прогнозами до 2030 р. – до 648 млн дол США (Graphene Market, 2020) (рис. 5). Наша країна впевнено замикає сімку з оціненими річними обсягами в 15 тис. т. Основними ж споживачами залишаються промислово розвинені країни з

диверсифікованою структурою промислового сектора, як США, КНР, Японія. За оцінками статистичного бюро Statista, у 2025 р. загальна капіталізація ринку графіту досягне 27 млрд дол США.

Азіатсько-Тихоокеанський регіон (АРАС) був найбільшим на ринку графену за весь історичний період (2014–2019), оскільки споживання сполуки в секторах медицини, електрики, електроніки та енергетики Китаю є досить високим. Зростає застосування графену в автомобільній та аерокосмічній промисловості країн регіону, включаючи Індію, Китай та Південну Корею.

Численні публікації у всесвітньовідомих наукових журналах і повідомлення наукових центрів та університетів свідчать про надзвичайно корисні властивості нового матеріалу, а подекуди він вже застосовується. Наприклад, дослідники з Університету Ексетера (The University of Exeter, Великобританія) (Kim et al., 2015) продемонстрували, як цей матеріал може генерувати складні й керовані звукові сигнали у разі нагрівання та охолодження, що може стати основою нового покоління аудіовізуальних технологій. Результатом відкриттів може стати можливість включення динаміків до ультратонких технологій сенсорного екрану, в яких екран здатний створювати звук самостійно.

Так, учні з Технологічного інституту Джорджії (Georgia Institute of Technology, США) виявили (Gao et al., 2018), що плівка із графену, нанесена у два шари, може захистити від кулі. Цей надлегкий і надміцний матеріал вони назвали "діаміном" і пропонують використовувати у виробництві бронежилетів. Захисні покриття на основі графену можуть бути використані для захисту екрана та корпусу пристроїв, наприклад у смартфонах, планшетах і ноутбуках.

Фахівцям з університету Сінсю (Shinshu University, Японія) і Державного університету Пенсільванії (Pennsylvania State University, США) удалося частково

розв'язати проблему фільтрації солі з морської води, зробивши цікавий спосіб опріснення води за допомогою сита з мембран, вироблених з оксиду графена (*Abraham et al., 2017*). Вони розробили гібридний фільтр, до

мембрани якого входить чистий графен, яка не руйнується у разі сильної течії і має низьку вартість у виробництві. У результаті вона відфільтровує 85 % солі, яка придатна для використання в сільському господарстві.

Рис. 5. Світовий ринок графену до 2030 р. (*Graphene Market, 2020*)

Команда вчених з Інституту полімерних досліджень ім. Лейбніца в Німеччині розробила графенове покриття, яке може сигналізувати фахівцям про можливе ушкодження конструкцій, наприклад мосту, простою зміною кольору (*Dengetal., 2017*). Якщо ці дослідження будуть ефективно вирішені, кольорові графенові покриття потенційно можуть стати неоціненним інструментом в арсеналі конструкторів та інженерів-конструкторів.

У грудні 2017 р. дослідники з приватного університету Райса (Rice University, США) повідомили, що їм удалось створити спортивне взуття – кросівки з графена, яке відрізняється неймовірною міцністю і зносостійкістю, водночас дуже зручне і характеризується відмінними електропровідними властивостями (*Robinson, 2017*).

Учені з Університету штату Іллінойс (Illinois State University, США) продемонстрували, як графен легко виявляє ракові клітини (*Keisham et al., 2016*). Розвиваються дослідження із застосування графену для діагностики стану здоров'я людини (*Syama and Mohanan, 2019*) (визначати температуру тіла і гідратацію людської шкіри, робити електрокардіограму, електроміографію та зчитувати електроенцефалограми для вимірювання електричної активності серця, м'язів і мозку). Роботи в цьому напрямі ще ведуться, і хто знає, може в майбутньому нас чекають ще й нові відкриття в діагностиці нашого організму за допомогою графена.

У 2016 р. китайська компанія Dongxu Optoelectronic створила акумулятор G-King (*Peleg, 2016*) з потужною ємністю 4800 мА·год, який можна повністю зарядити протягом 15 хв. Також його розробники вважають, що він може витримати 3500 циклів розрядки й зарядки, що приблизно в сім разів перевищує термін служби середньої літій-іонної батареї. Крім збільшення ефективності батарей у пристроях, графен може стати в нагоді для створення пристроїв із гнучкими екранами, різні версії яких сьогодні розробляються.

Висновки. Сьогодні одним із головних завдань інженерів стає підвищення ємності й тривалості роботи акумуляторів. У світі електрокарів і наявності Інтернету автономність пристроїв відіграватиме ключову роль у забезпеченні безперебійної роботи не просто персональних пристроїв, а й у виконанні державних функцій та в безпеці громадян. Розв'язати цю проблему в терміни, адекватні сучасним реаліям, може не лише збільшення видобутку таких елементів, як літій та нікель, а й спроба частково замінити їх "традиційними" природними елементами. Так званим "рятувальним човном" може виступити графіт, у видобутку якого наша країна точно не відстає у світових масштабах.

Виявлені на території України нові родовища зі значними прогнозними ресурсами графіту (Буртинське, Балахівське, Сачкінсько-Троїцьке та низка нових ділянок) дадуть змогу не лише підтримувати на належному рівні, а й за необхідності значно розширяти існуючу мінерально-сировинну базу, завдяки чому Україна зможе стати одним із найбільших у світі постачальників якісної графітової продукції й повною мірою реалізувати всі амбіції щодо розбудови інновативної промисловості майбутнього.

Вкладення в дослідження графену – це вкладення в майбутнє, нехай поки і без чіткого розуміння, яким воно буде. Саме тому нині так складно спрогнозувати обсяги ринку через кілька років за поточними прогнозами, ринок графену протягом десятиліття виросте в 30–100 разів. Однак він може вирости і в тисячі разів – досить лише з'явитися розумним контактним лінзам на основі графену, запустити в серійне виробництво акумулятори, що швидко заряджаються або розробити будь-яку іншу технологію, яку сьогодні складно уявити. Так само, як колись складно було уявити, як розвинеться ринок лазерів чи комп'ютерної техніки.

Список використаних джерел

- Гурський, Д.С., Єсипчук, К.Ю., Калінін, В.І. та ін. (2006). Металічні і неметалічні корисні копалини України. Т. 2. Київ: Центр Європи.
- Державний баланс запасів України. (2011). Київ.
- Загітко, В., Лижаченко, Н. (2012). Динаміка видобування та реалізації графіту в Україні та світі. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 58, 32–35.
- Іванців, О.Є. (1972). Геологія та генезис графітових родовищ України. Київ: Наукова думка.
- Кропивний, В.М., Молокост, Л.А., Кузик, О.В., Кропивна, А.А. (2019). Порівняльна промислова оцінка графітових родовищ та руд України, характеристика збагачення руд. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 1 (32), 93–102.
- Лижаченко, Н.М., Ніколаєвський, В.П., Ніколаєвський, І.В. та ін. (2013). Характеристика схем збагачення графітових руд Завалівського, Балахівського та Буртинського родовищ Українського щита. *Геол. журнал*, 2, 51–58.
- ТОВ "Заваллівський графіт" (н.д.). Отримано 12 січня 2021 із <https://zvgraphit.com.ua/about-company/>
- Яценко, В.Г. (2008). Геологія, мінералогія і генезис графіта Українського щита. Київ: Логос.
- Abraham, J., Vasu, K., Williams, C. et al. (2017). Tunable sieving of ions using graphene oxide membranes. *Nature Nanotech.*, 12, 546–550. <https://doi.org/10.1038/nnano.2017.21>
- Deng, Y., Gao, S. et al. (2017). Variable structural colouration of composite interphases. *Mater. Horiz.*, 4, 389–395. <https://doi.org/10.1039/C6MH00559D>
- Gao, Y., Cao, T., Cellini, F. et al. (2018). Ultrahard carbon film from epitaxial two-layer graphene. *Nature Nanotech.*, 13, 133–138. <https://doi.org/10.1038/s41565-017-0023-9>
- Graphene Market Research Report: By Form (Powder, Dispersion), Application (Electrical & Electronics, Composites, Energy, Biomedical) – Global Industry Analysis and Demand Forecast to 2030. (2020). Отримано 20 січня 2021 з <https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/graphene-market>
- Keisham, B., Cole, A. et al. (2016). Cancer Cell Hyperactivity and Membrane Dipolarity Monitoring via Raman Mapping of Interfaced Graphene: Toward Non-Invasive Cancer Diagnostics. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, 48, 32717–32722. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12307>
- Kim, Y., Kim, H., Cho, Y. et al. (2015). Bright visible light emission from graphene. *Nature Nanotech.*, 10, 676–681. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.118>
- Peleg, R. (2016). Dongxu unveils an impressive graphene-enhanced battery. Отримано 15 січня 2021 з <https://www.graphene-info.com/dongxu-unveils-impressive-graphene-enhanced-battery>
- Pulidindi, K., Prakash, A. (2019). Graphene Market Size By Product (Graphene Oxide, Graphene Nanoplatelets, Mono-layer & Bi-layer Graphene, Others), By Application (Electronics, Aerospace & Defense, Energy, Automotive, Healthcare, Others), Industry Analysis Report, Regional Outlook, Application Growth Potential, Price Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2019–2026. Отримано 15 січня 2021 з <https://www.gminsights.com/industry-analysis/graphene-market>
- Robinson, B. (2017). Graphene at the forefront of a sports footwear revolution. Отримано 15 січня 2021 з <https://techcrunch.com/2017/12/09/graphene-running-shoes-will-hit-the-market-next-year/>
- Syama, S., Mohanan, P.V. (2019). Comprehensive Application of Graphene: Emphasis on Biomedical Concerns. *Nano-Micro Lett.*, 11, 6. <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0237-5>

References

- Abraham, J., Vasu, K., Williams, C. et al. (2017). Tunable sieving of ions using graphene oxide membranes. *Nature Nanotech.*, 12, 546–550. <https://doi.org/10.1038/nnano.2017.21>
- Deng, Y., Gao, S. et al. (2017). Variable structural colouration of composite interphases. *Mater. Horiz.*, 4, 389–395. <https://doi.org/10.1039/C6MH00559D>
- Gao, Y., Cao, T., Cellini, F. et al. (2018). Ultrahard carbon film from epitaxial two-layer graphene. *Nature Nanotech.*, 13, 133–138. <https://doi.org/10.1038/s41565-017-0023-9>
- Graphene Market Research Report: By Form (Powder, Dispersion), Application (Electrical & Electronics, Composites, Energy, Biomedical) – Global Industry Analysis and Demand Forecast to 2030. (2020). Retrieved January, 20, 2021, from <https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/graphene-market>
- Hurskiy, D.S., Yesypchuk, K.Yu., Kalinin V.I. et al. (2006). Metallic and non-metallic minerals of Ukraine. V. 2. Kyiv: Tsentr Yevropy. [In Ukrainian]
- Ivantsiv, O.Ye. (1972). Geology and genesis of graphite deposits of Ukraine. Kyiv: Naukova dumka. [In Ukrainian]
- Keisham, B., Cole, A. et al. (2016). Cancer Cell Hyperactivity and Membrane Dipolarity Monitoring via Raman Mapping of Interfaced Graphene: Toward Non-Invasive Cancer Diagnostics. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, 48, 32717–32722. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12307>
- Kim, Y., Kim, H., Cho, Y. et al. (2015). Bright visible light emission from graphene. *Nature Nanotech.*, 10, 676–681. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.118>
- Kropivnyi, V.M., Molokost, L.A., Kuzyk, O.V., Kropivna, A. (2019). Comparative Industrial Assessment of Graphite Deposits and Ores of Ukraine, Characteristics of Ore Enrichment. *Central ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 1(32), 93–102. [In Ukrainian]
- Lyzhachenko, N.M., Nikolaevsky, V.P., Nikolaevsky, I.V. et al. (2013). Characteristics of graphite ore enrichment schemes of Zavalivske, Balakhivske and Burtynske deposits of the Ukrainian Shield. *Geological journal*, 2, 51–58. [In Ukrainian]
- Peleg, R. (2016). Dongxu unveils an impressive graphene-enhanced battery. Retrieved January, 15, 2021, from <https://www.graphene-info.com/dongxu-unveils-impressive-graphene-enhanced-battery>
- Pulidindi, K., Prakash, A. (2019). Graphene Market Size By Product (Graphene Oxide, Graphene Nanoplatelets, Mono-layer & Bi-layer Graphene, Others), By Application (Electronics, Aerospace & Defense, Energy, Automotive, Healthcare, Others), Industry Analysis Report, Regional Outlook, Application Growth Potential, Price Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2019–2026. Retrieved January, 15, 2021, from <https://www.gminsights.com/industry-analysis/graphene-market>
- Robinson, B. (2017). Graphene at the forefront of a sports footwear revolution. Retrieved January, 15, 2021, from <https://techcrunch.com/2017/12/09/graphene-running-shoes-will-hit-the-market-next-year/>
- State balance of reserves of Ukraine. (2011). Kyiv. [In Ukrainian]
- Syama, S., Mohanan, P.V. (2019). Comprehensive Application of Graphene: Emphasis on Biomedical Concerns. *Nano-Micro Lett.*, 11, 6. <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0237-5>
- Yatsenko, V.H. (2008). Geology, mineralogy and genesis of graphite of the Ukrainian Shield. Kyiv: Lohos. [In Ukrainian]
- Zahnitko, V., Lyzhachenko, N. (2012). Dynamics of graphite extraction and realization in Ukraine and worldwide. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 58, 32–35. [In Ukrainian]
- Zavalivskiy Graphite Ltd. (n.d.). Retrieved January, 12, 2021, from <https://zvgraphit.com.ua/about-company/>

Надійшла до редколегії 01.06.21

G. Rudko, Dr. Sci. Geol.-Min., Geogr., Techn., Prof.,
Chairman of the State Commission of Ukraine on Mineral Resources,
E-mail: office@dkz.gov.ua,
18/7 Hen. Almazova Str., of. 816, Kyiv, 01133, Ukraine

GEOLOGY OF GRAPHITE DEPOSITS OF UKRAINE AND PROSPECTS OF EXTRACTION IN MODERN CONDITIONS

Extraction of graphite and its use in various spheres of production and technology play a significant role in the economies of many countries. Distinctive characteristics of graphite, which is one of the most common forms of carbon in nature (good electrical conductivity, low hardness, resistance to heat and aggressive environments), are widely used by scientists in various scientific developments.

After British researchers of Russian origin from the University of Manchester Andre Geim and Konstantin Novoselov published an article about properties of the first studied two-dimensional graphene crystal in the journal Science in 2004, and numerous studies of properties of the new material, the demand for graphite ore has been increasing, and, according to some forecasts, it will amount to more than \$ 400 million by 2026.

Natural flake graphite can be used in new technologies, such as graphene, which is now used in various scientific experiments, as well as in the production of lithium-ion batteries, fuel cells, nuclear and solar power plants.

Geological conditions of the Zavalivske graphite deposit, which is the main source of graphite in Ukraine, have been briefly presented in the paper, and perspectives of identified areas that can become an additional reserve of graphite ore have been outlined.

Significant prognosis resources of graphite in new deposits, which have been recently discovered in Ukraine (Burtynske, Balakhivske, Sachkynsko-Troitske, a number of new sites within the Zavallia area), allow not only to maintain at the appropriate level, but also, if necessary, expand existing mineral raw material base, so Ukraine could become one of the world's largest suppliers of graphite products.

Graphene has a great mechanical strength and a very high thermal conductivity. An extremely high mobility of electrons makes graphene a perspective material for the application in various fields, in particular, as a future basis for nanoelectronics and possible replacement of silicon in integrated circuits. Results on the application of unique properties of graphene have been presented.

Keywords: graphite, graphite deposits, Zavalievskiy deposit, graphene.

Г. Рудько, д-р геол.-минерал., геогр., техн. наук, проф.,
председатель Государственной комиссии Украины по запасам полезных ископаемых,
E-mail: office@dkz.gov.ua,
ул. Ген. Алмазова (Кутузова), 18/7, комн. 816, г. Киев, 01133, Украина

ГЕОЛОГИЯ ГРАФИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УКРАИНЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДОБЫЧИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Добыча графита и его использование в различных отраслях производства и техники играет значительную роль в экономике многих стран мира. Отличительные характеристики графита, который является одним из самых распространенных в природе форм углерода (хорошая электропроводность, низкая твердость, устойчивость к нагреванию и воздействию агрессивных сред) широко используются учеными в различных научных разработках.

После того как в 2004 г. в журнале Science британскими исследователями российского происхождения из Манчестерского университета Андреем Геймом и Константином Новоселовым была опубликована статья о свойствах первого исследованного двумерного кристалла графена, а также многочисленных исследований свойств нового материала, спрос на графитовые руды только увеличивается и по некоторым прогнозам до 2026 г. составит более 400 млн дол США.

Чешуйчатый природный графит можно применять в новых технологиях, таких как графен, который сегодня используется в различных научных испытаниях, а также при производстве литиево-ионных батарей, в топливных элементах, в установках по производству ядерной и солнечной энергии.

В работе кратко приведены геологические условия Завальевского графитового месторождения, которое сейчас является основным источником графита в Украине, и намечены перспективы выявленных участков, которые могут стать дополнительным резервом графитовых руд.

Значительные прогнозные ресурсы графита новых месторождений, обнаруженных в последнее время на территории Украины (Буртыньское, Балаховское, Сачкинско-Троицкое, ряд новых участков в районе Завалья), дают возможность не только поддерживать на должном уровне, но и при необходимости значительно расширить существующую минерально-сырьевую базу, благодаря чему Украина может стать одним из крупнейших в мире поставщиков графитовой продукции.

Графен имеет огромную механическую прочность и рекордно высокую теплопроводность. Чрезвычайно высокая подвижность электронов в нем делает графен перспективным материалом для использования в самых различных областях, в частности, как будущую основу нанoeлектроники и возможную замену кремния в интегральных микросхемах. Приведены результаты по использованию уникальных свойств графена.

Ключевые слова: графит, графитовые месторождения, Завальевское месторождение, графен.