

АНОТАЦІЯ

Чердиченко С.В. Синтез та особливості фізичних властивостей вуглецевих наноструктур і композитів — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 — Фізика та астрономія (10 — Природничі науки). — Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України, Харків, 2024.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню особливостей нових вуглецевих наноструктур та композитів, зокрема, модифікованого високочастотним розрядом в атмосфері водню термічно відновленого декількашарового оксиду графену (МТВОГ), заснованих на модифікованому графені полімерних композитів та отриманого методом термовакуумної криогенної сублімації гідратованого фулерену C_{60} .

Зокрема, виявлено, що I) обробка високочастотним розрядом в атмосфері водню термічно відновленого декількашарового оксиду графену суттєво змінює його адсорбційні характеристики; II) композитні структури на основі епоксидного компаунду та поліефірної смоли при певних методиках додавання оксиду графену, термічно відновленого оксиду графену (ТВОГ) та МТВОГ набувають ряд значно підвищених механічних характеристик; III) якісно підтверджено можливість отримання стабільного розчину фулерена C_{60} у воді вакуумно-криогенно-сублімаційним методом без використання органічних розчинників.

Експериментальні дослідження сорбційних властивостей виконувались методами термопрограмованої десорбції. Спектральні характеристики гідратованого фулерена C_{60} досліджувалися методом УФ-видимої спектроскопії поглинання, було проведено маспектроскопічний аналіз гідратованого фулерену C_{60} .

У **вступі** наведено обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи. Наведено інформацію про наукові програми, в рамках яких виконувалася дисертація. Описано мету, завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, означено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Зазначено особистий внесок здобувача, надано інформацію про апробацію результатів. Також наведено дані про структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Вуглецеві наноструктури, їх основні характеристики (огляд літератури)» наведено літературний огляд впливу енергетичного-геометричного стану конденсованого вуглецю на морфологію і сорбційні властивості графену та розглянуті відмінності енергетичної структури графену та фулерену. Окрему увагу приділено фізичній і хімічній модифікації та методам синтезу означених наноструктур.

У **другому розділі** «Методика експерименту, сорбційні властивості відновленого оксиду графена» наведено опис методики отримання та наступної характеристики термічно відновленого оксиду графену (ТВОГ). Також у цьому розділі надано опис розробленого в дисертаційній роботі оригінального методу модифікації ТВОГ шляхом обробки високочастотним імпульсним розрядом в атмосфері водню. Крім того, в розділі наведено опис експериментального устаткування і методик дослідження сорбційних властивостей наноструктур при низьких температурах.

У **третьому розділі** «Вплив обробки імпульсним високочастотним розрядом на сорбційні властивості термічно відновленого оксиду графена» методом скануючої електронної мікроскопії досліджено морфологію модифіковано зразка ТВОГ, показано, що обробка високочастотним розрядом в середовищі водню приводить до розшарування, тобто деформації вуглецевих площин, збільшення «пор» МТВОГ.

Найважливішими результатами досліджень, котрі демонструють вплив обробки на сорбційні властивості МТВОГ при низьких температурах, можна вважати:

- Виявлено зсув максимуму температурної залежності кількості сорбованого водню до області низьких температур (з 30 К для ТВОГ до 20 К для МТВОГ). Означене явище може бути спричинено збільшенням міжшарових відстаней, частковим руйнуванням вуглецевих шарів та наявністю хімічної модифікації площин графену воднем в процесі обробки водневою плазмою.

- Аналіз температурних залежностей часів сорбції водню зразком МТВОГ показав уповільнення процесу сорбції в інтервалі 30 - 40 К. Зроблено припущення, що це явище спричинено фізичною взаємодією молекулярного водню з хімічно сорбованими графеном атомами водню, внаслідок чого дифузія молекулярного водню (сорбату) у прошарках між вуглецевими площинами стає утрудненою.

- Визначення кількості хімічно сорбованого зразком МТВОГ водню в інтервалі температур 293–1223 К виявило вихід водню включно до 1223 К, що підтверджує хімічну модифікацію графенових лусок воднем в процесі обробки плазмою. Також при нагріві зразку МТВОГ крім водню спостерігались виходи метану, вуглекислого газу та монооксиду вуглецю, що свідчить про хімічну модифікацію графену. Загальна концентрація хімічно сорбованого зразком МТВОГ атомарного водню становила 15,4 ат. % (або 1,3% маси). Виявлено, що обробка ТВОГ імпульсним газовим розрядом збільшила фізичну сорбцію водню в 1,5 рази.

Результати всіх проведених досліджень підтверджують наявність хімічної модифікації атомами водню зразка ТВОГ в процесі обробки плазмою водню.

Четвертий розділ «Вплив домішки термічно відновленого оксиду графену на механічні властивості полімерних композитів» присвячено створенню та механічним випробуванням полімерних композитів:

- клейовий композит епоксидна смола – оксид графену;
- конструкційний композит поліефірна смола – скловолокно – оксид графену (термічно відновлений та оброблений плазмою водню).

Для створення *епоксидного клейового композиту* використовувався термічно відновлений при температурі 300 °С оксид графену (ТВОГ), який було отримано хімічною інтеркаляцією графіту з подальшою ексfolіацією. Такий зразок містив не більше 15 ат. % хімічно зв'язаного кисню для забезпечення кращої адгезії ТВОГ до полімером. Для *поліефірного конструкційного композиту* у якості домішок використовувалися ТВОГ і МТВОГ з метою порівняння впливу модифікації графену воднем на механічні властивості композиту.

За результатами стандартних механічних випробувань були отримані такі результати:

- у випадку клейового епоксидного композита міцність клейового з'єднання виросла більше ніж у 3 рази (концентрація ТВОГ 1%/епоксидна смола без затверджувача) порівняно з клейовим з'єднанням з чистою епоксидною матрицею;

- у випадку конструкційного композита поліефірна смола – скловолокно – ТВОГ (концентрація ТВОГ 1мас %/поліефірна смола без затверджувача) мікротвердість виросла до 80%, ударна в'язкість до 37%, міцність при статичному вигині збільшилася на 52 % відносно контрольного зразка без ТВОГ. У разі додавання МТВОГ до поліефірної матриці в тій самій концентрації мікротвердість зросла до 100%, ударна в'язкість до 43 %, міцність при статичному вигині до 54% відносно контрольного зразка.

У **п'ятому розділі** «Отримання та властивості гідратованого фулерену» розглянуто застосування оригінального методу вакуумно-сублімаційного криогенного осадження (*Vacuum-sublimation cryogenic deposition (VS-CD)*) для одержання водно-колоїдного розчину фулерену (*FWCS*).

Показано, що тверда фаза, яка отримана конденсацією суміші пару фулерену C_{60} і пару води на металевій поверхні, охолодженій рідким азотом, після плавлення являє собою стабільний водний колоїдний розчин фулерену C_{60} без застосування будь-якої диспергуючої обробки, наприклад опромінення ультразвуком. Результати характеристики FWCS за допомогою, UV-Vis спектроскопії поглинання та їх порівняння з відомими літературними даними щодо гідратованих фулеренів дали змогу зробити висновок про наявність у FWCS комплексів $C_{60}@ \{H_2O\}_n$ гідратованого фулерену C_{60} .

За допомогою трансмісійної електронної мікроскопії показано, що отриманий VS-CD методом матеріал містить переважно поодинокі молекули та невеликі агломерати C_{60} розміром приблизно 2-5 нм. Мас-спектрометрія з лазерною десорбцією/іонізацією продемонструвала наявність чистого фулерену C_{60} і практичну відсутність будь-яких продуктів його деструкції.

Отримані в дисертаційній роботі результати не тільки поглиблюють фундаментальне знання щодо властивостей вуглецевих структур, але й мають суто практичне значення. Модифікований високочастотним імпульсним розрядом термічно відновлений оксид графену являє собою новий матеріал, який має підвищені характеристики щодо сорбції водню та його зберігання, що може бути використано при створенні водневих паливних комірок. З іншої сторони, цей матеріал може бути застосований для створення нанокомпозитів на полімерній основі, які можуть бути використані у якості клеїв або конструкційних матеріалів, які матимуть підвищені механічні характеристики. Такі матеріали є вельми перспективними для використання при створенні елементів конструкцій безпілотних літальних апаратів, у літакобудуванні та аерокосмічній техніці, оскільки мають малу вагу та підвищені експлуатаційні властивості.

Запропонований в роботі криогенний вакуумно-сублімаційний метод отримання колоїдних розчинів фулеренів у воді може бути застосовано для

створення стабільних водних комплексів органічних і неорганічних сполук. При цьому, отриманий гідратований фулерен є перспективним для застосувань у біофізичних дослідженнях, у якості молекулярних маркерів та каталізаторів.

Ключові слова: конденсований вуглець, вуглецеві наноструктури, графен, оксид графену, інтеркальований графіт, воднева плазма, багатошарові матеріали, бар'єр хемосорбції, вуглецева гібридизація, кривизна структури, фулерен C₆₀, гідратований фулерен, водний клатрат, низькі температури, UV-Vis спектроскопія, ІЧ абсорбційна спектроскопія, лазерна десорбційна/іонізаційна мас-спектрометрія (LDI), термопрограмована десорбція.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. A. V. Dolbin, N. A. Vinnikov, V. B. Esel'son, V. G. Gavrillo, R. M. Basnukaeva, M. V. Khlistyuck, **S. V. Cherednychenko**, The impact of treating graphene oxide with a pulsed high-frequency discharge on the low-temperature sorption of hydrogen, *Low Temperature Physics*, 46, 293 (2020). <https://doi.org/10.1063/10.0000701>, (Q3).
2. N. A. Vinnikov, **S. V. Cherednychenko**, A. V. Dolbin, V. B. Eselson, V. G. Gavrillo, R. M. Basnukaeva, and A. M. Plokhotnichenko, The new approach for obtaining aqueous solutions of fullerene $C_{60} @ \{H_2O\}_n$ by the cryogenic sublimation method *Low Temperature Physics*, 48, 336 (2022). <https://doi.org/10.1063/10.0009739> (Q3).
3. **S. V. Cherednichenko**, G. V. Andrievsky, N. A. Vinnikov, A. V. Dolbin, M. V. Kosevich, V. S. Shelkovsky, et al., Raman, UV-Vis, MS, and IR characterization of molecular-colloidal solution of hydrated fullerenes C_{60} obtained using vacuum-sublimation cryogenic deposition method. Is the C_{60} molecule truly highly hydrophobic?, *Low Temperature Physics*, 50, 248 (2024). <https://doi.org/10.1063/10.0024965> (Q3).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. R. M. Basnukaeva, A. V. Dolbin, V. B. Eselson, V. G. Gavrillo, N. A. Vinnikov, M. V. Khlistuck, **S. V. Cherednychenko**, "Effect of cold plasma treatment on low-temperature sorption by thermally reduced graphene oxide" in Book of Abstract of the International Advanced Study Conference «Condensed Matter & Low Temperature Physics 2020» (CM<P 2020), Ukraine, Kharkiv, June 8-14, 2020.

5. **S. V. Cherednychenko**, A. V. Dolbin, N. A. Vinnikov, V. B. Esel'son, V. G. Gavrillo, R. M. Basnukaeva, "Graphene-based nanocomposite adhesive compounds" in Book of Abstract of the International Advanced Study Conference «Condensed Matter & Low Temperature Physics 2021» (CM<P 2021), Ukraine, Kharkiv, June 6-12, 2021.
6. R. M. Basnukaeva, A. V. Dolbin, N. A. Vinnikov, A. M. Plohotnichenko, V. B. Esel'son, V. G. Gavrillo, **S. V. Cherednychenko**, "Electrophysical properties of aqueous colloidal solutions of aqueous colloidal solutions of C₆₀" in Book of Abstract of the International Advanced Research Workshop "Thermal conductivity of solid states at low temperature", Ukraine, Kharkov, June 8, 2021.
7. **S. V. Cherednychenko**, A. V. Dolbin, N. A. Vinnikov, V. B. Esel'son, V. G. Gavrillo, "Preparation of colloidal aqueous solution of C₆₀ fullerene by the sublimation method and its optical/electrophysical properties" in Book of Abstract of the 7th International Conference «NANOBIOPHYSICS: Fundamental and Applied Aspects» (NBP 2021), Ukraine, Kharkov, October 4-8, 2021.
8. **S. V. Cherednychenko**, A. V. Dolbin, G. I. Dovbeshko¹, N. A. Vinnikov, V. B. Esel'son, V. G. Gavrillo, R. M. Basnukaeva, "Optical properties of aqueous colloidal solution of fullerenes C₆₀" in Book of Abstract of the III International Advanced Study Conference «Condensed Matter & Low Temperature Physics 2023» (CM & LTP 2023), Ukraine, Kharkov, June 5-11, 2023.
9. **S. Cherednychenko**, N. Vinnikov, V. Boiko, G. Dovbeshko, A. Dolbin, "Spectroscopic and electrophysical studies of a solution of fullerene C₆₀ molecules in water" in Book of Abstract of the 8th International Conference «NANOBIOPHYSICS: Fundamental and Applied Aspects» (NBP 2023), Ukraine, Kyiv, October 3-6, 2023.

ABSTRACT

Cherednychenko S. Synthesis and features of carbon nanostructures and composites - Qualifying scientific work on manuscript rights - Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 104 - "Physics and Astronomy" (10-Natural sciences). B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to the study of the features of new carbon nanostructures and composites, in particular, thermally reduced multi-layer graphene oxide (MTGO) modified by a high-frequency discharge in a hydrogen atmosphere, polymer composites based on modified graphene and obtained by the method of thermos-vacuum cryogenic sublimation of hydrated C₆₀ fullerene.

In particular, it was found that i) treatment with a high-frequency discharge in a hydrogen atmosphere of thermally reduced multi-layer graphene oxide (MTRGO) significantly changes its adsorption characteristics; ii) composite structures based on epoxy compound and polyester resin with certain methods of adding graphene oxide, thermally reduced graphene oxide (TRGO) and MTRGO acquire a number of significantly increased mechanical characteristics; iii) the possibility of obtaining a stable solution of C₆₀ fullerene in water by the vacuum-cryogenic-sublimation method without the use of organic solvents was qualitatively confirmed.

Experimental studies of sorption properties were performed using thermos-programmed desorption methods. Spectral characteristics of hydrated C₆₀ fullerene were studied by UV-visible absorption spectroscopy, mass spectroscopic analysis of hydrated C₆₀ fullerene was carried out.

The introduction provides a rationale for the relevance of the topic of the dissertation. Information is given about the scientific programs within which the dissertation was carried out. The purpose, task, object, subject and research methods are described, the scientific novelty and practical value of the obtained results are defined. The personal contribution of the acquirer is indicated, information is

provided about the approval of the results. Data on the structure and scope of the dissertation work are also provided.

In the **first chapter** " Carbon nanostructures, their main characteristics (literature review)" a literature review of the influence of the energy-geometric state of condensed carbon on the morphology and sorption properties of graphene and the differences in the energy structure of graphene and fullerene are considered. Particular attention is paid to the physical and chemical modification and methods of synthesis of the specified nanostructures.

The **second chapter** "Experimental methodology, sorption properties of reduced graphene oxide" describes the method of obtaining and subsequent characterization of thermally reduced graphene oxide (TRGO). Also, this section provides a description of the original method of modification of TRGO by high-frequency pulsed discharge treatment in a hydrogen atmosphere, developed in the dissertation work. In addition, the chapter describes the experimental equipment and methods of studying the sorption properties of nanostructures at low temperatures.

In the **third chapter**, "The effect of treatment with a pulsed high-frequency discharge on the sorption properties of thermally reduced graphene oxide", the morphology of a modified TRGO sample was investigated by scanning electron microscopy, it was shown that treatment with a high-frequency discharge in a hydrogen environment leads to delamination, i.e., deformation of carbon planes, an increase in the "pores" of MTRGO.

The most important results of studies that demonstrate the effect of processing on the sorption properties of MTRGO at low temperatures can be considered:

- A shift of the maximum temperature dependence of the amount of sorbed hydrogen to the region of low temperatures was revealed (from 30 K for TRGO to 20 K for MTRGO). This phenomenon can be caused by an increase in interlayer distances, partial destruction of carbon layers, and the presence of chemical

modification of graphene planes with hydrogen in the process of hydrogen plasma treatment.

- Analysis of the temperature dependence of hydrogen sorption times by the MTRGO sample showed a slowdown of the sorption process in the range of 30-40 K. It is assumed that this phenomenon is caused by the physical interaction of molecular hydrogen with hydrogen atoms chemically sorbed by graphene, as a result of which diffusion of molecular hydrogen (sorbate) in the interlayers between carbon planes becomes difficult.

- Determination of the amount of hydrogen chemically sorbed by the MTRGO sample in the temperature range of 293–1223 K revealed the release of hydrogen up to and including 1223 K, which confirms the chemical modification of graphene scales with hydrogen during plasma treatment. Also, during heating of the MTRGO sample, in addition to hydrogen, methane, carbon dioxide, and carbon monoxide were released, which also indicates chemical modification of graphene. The total concentration of atomic hydrogen chemically sorbed by the MTRGO sample was 15.4 atoms. % (or 1.3% by mass). It was found that the treatment of TRGO with a pulsed gas discharge increased the physical sorption of hydrogen by 1.5 times.

The results of all conducted studies confirm the presence of chemical modification of the TRGO sample with hydrogen atoms in the process of hydrogen plasma treatment.

The **fourth chapter** "The influence of the admixture of thermally reduced graphene oxide on the mechanical properties of polymer composites" is devoted to the creation and mechanical testing of polymer composites:

- adhesive composite epoxy resin - graphene oxide;
- structural composite polyester resin - glass fiber - graphene oxide (thermally restored and treated with hydrogen plasma).

To create an epoxy adhesive composite, thermally reduced at a temperature of 300 °C, graphene oxide (TRGO), which was obtained by chemical intercalation of

graphite with subsequent exfoliation, was used. Such a sample contained no more than 15 at. % of chemically bound oxygen to ensure better adhesion of TRGO to the polymer. For the polyester construction composite, TRGO and MTRGO were used as impurities in order to compare the effect of graphene modification with hydrogen on the mechanical properties of the composite.

According to the results of standard mechanical tests, the following results were obtained:

- in the case of an adhesive epoxy composite, the strength of the adhesive joint increased more than 3 times (TRGO concentration 1%/epoxy resin without hardener) compared to an adhesive joint with a pure epoxy matrix;

- in the case of the polyester resin – glass fiber – TRGO structural composite (TRGO concentration 1 wt. %/polyester resin without hardener), microhardness increased to 80%, impact strength to 37%, static bending strength increased by 52% compared to the control sample without TRGO. When MTRGO was added to the polyester matrix in the same concentration, the microhardness increased to 100%, the impact toughness to 43%, and the static bending strength to 54% compared to the control sample.

In the fifth chapter, "Preparation and properties of hydrated fullerene", the application of the original method of vacuum-sublimation cryogenic deposition (VS-CD) for the preparation of water-colloidal solution of fullerene (FWCS) is considered.

It is shown that the solid phase obtained by condensation of a mixture of C₆₀ fullerene vapor and water vapor on a metal surface cooled by liquid nitrogen, after melting, is a stable aqueous colloidal solution of C₆₀ fullerene without the use of any dispersing treatment, such as ultrasound irradiation. The results of the FWCS characterization using UV-Vis absorption spectroscopy and their comparison with known literature data on hydrated fullerenes made it possible to conclude that the C₆₀@{H₂O}_n hydrated fullerene C₆₀ complexes are present in the FWCS.

With the help of transmission electron microscopy, it is shown that the material obtained by the VS-CD method contains mostly single molecules and small agglomerates of C₆₀ with a size of approximately 2-5 nm. Laser desorption/ionization mass spectrometry demonstrated the presence of pure fullerene C₆₀ and the virtual absence of any degradation products.

The results obtained in the dissertation work not only deepen fundamental knowledge about the properties of carbon structures, but also have purely practical significance. Thermally reduced graphene oxide modified by a high-frequency pulsed discharge is a new material that has improved characteristics in terms of hydrogen sorption and storage, which can be used in the creation of hydrogen fuel cells. On the other hand, this material can be used to create polymer-based nanocomposites that can be used as adhesives or structural materials that will have increased mechanical characteristics. Such materials are very promising for use in the creation of structural elements of unmanned aerial vehicles, in aircraft construction and aerospace engineering, as they have low weight and enhanced operational properties.

The proposed cryogenic vacuum-sublimation method of obtaining colloidal solutions of fullerenes in water can be used to create stable aqueous complexes of organic and inorganic compounds. At the same time, the obtained hydrated fullerene is promising for applications in biophysical research, as molecular markers and catalysts.

Keywords: condensed carbon, carbon nanostructures, graphene, graphene oxide, intercalated graphite, hydrogen plasma, multilayer materials, chemical sorption barrier, carbon hybridization, curvature of the structure, fullerene C₆₀, hydrated fullerene, water clathrate, low temperatures, UV-Vis spectroscopy, IR absorption spectroscopy, laser desorption/ionization mass spectrometry (LDI), thermos-programmed desorption.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE CANDIDATE BY THE TOPIC OF THE DISSERTATION

Scientific papers that present the main results of the dissertation:

1. A. V. Dolbin, N. A. Vinnikov, V. B. Esel'son, V. G. Gavrillo, R. M. Basnukaeva, M. V. Khlistyuck, **S. V. Cherednychenko**, The impact of treating graphene oxide with a pulsed high-frequency discharge on the low-temperature sorption of hydrogen, *Low Temperature Physics*, 46, 293 (2020). <https://doi.org/10.1063/10.0000701>, (Q3).
2. N. A. Vinnikov, **S. V. Cherednychenko**, A. V. Dolbin, V. B. Eselson, V. G. Gavrillo, R. M. Basnukaeva, and A. M. Plokhotnichenko, The new approach for obtaining aqueous solutions of fullerene $C_{60} @ \{H_2O\}_n$ by the cryogenic sublimation method *Low Temperature Physics*, 48, 336 (2022). <https://doi.org/10.1063/10.0009739> (Q3).
3. **S. V. Cherednichenko**, G. V. Andrievsky, N. A. Vinnikov, A. V. Dolbin, M. V. Kosevich, V. S. Shelkovsky, et al., Raman, UV-Vis, MS, and IR characterization of molecular-colloidal solution of hydrated fullerenes C_{60} obtained using vacuum-sublimation cryogenic deposition method. Is the C_{60} molecule truly highly hydrophobic?, *Low Temperature Physics*, 50, 248 (2024). <https://doi.org/10.1063/10.0024965> (Q3).

Scientific works that confirm the approbation of the results:

4. R. M. Basnukaeva, A. V. Dolbin, V. B. Eselson, V. G. Gavrillo, N. A. Vinnikov, M. V. Khlistuck, **S. V. Cherednychenko**, "Effect of cold plasma treatment on low-temperature sorption by thermally reduced graphene oxide" in Book of Abstract of the International Advanced Study Conference «Condensed Matter & Low Temperature Physics 2020» (CM<P 2020), Ukraine, Kharkiv, June 8-14, 2020.
5. **S. V. Cherednychenko**, A. V. Dolbin, N. A. Vinnikov, V. B. Esel'son, V. G. Gavrillo, R. M. Basnukaeva, "Graphene-based nanocomposite adhesive

- compounds” in Book of Abstract of the International Advanced Study Conference «Condensed Matter & Low Temperature Physics 2021» (CM<P 2021), Ukraine, Kharkiv, June 6-12, 2021.
6. R. M. Basnukaeva, A. V. Dolbin, N. A. Vinnikov, A. M. Plohotnichenko, V. B. Esel'son, V. G. Gavrillo, **S. V. Cherednychenko**, “Electrophysical properties of aqueous colloidal solutions of aqueous colloidal solutions of C₆₀” in Book of Abstract of the International Advanced Research Workshop “Thermal conductivity of solid states at low temperature”, Ukraine, Kharkov, June 8, 2021.
 7. **S. V. Cherednychenko**, A. V. Dolbin, N. A. Vinnikov, V. B. Esel'son, V. G. Gavrillo, “Preparation of colloidal aqueous solution of C₆₀ fullerene by the sublimation method and its optical/electrophysical properties” in Book of Abstract of the 7th International Conference «NANOBIOPHYSICS: Fundamental and Applied Aspects» (NBP 2021), Ukraine, Kharkov, October 4-8, 2021.
 8. **S. V. Cherednychenko**, A. V. Dolbin, G. I. Dovbeshko¹, N. A. Vinnikov, V. B. Esel'son, V. G. Gavrillo, R. M. Basnukaeva, “Optical properties of aqueous colloidal solution of fullerenes C₆₀” in Book of Abstract of the III International Advanced Study Conference «Condensed Matter & Low Temperature Physics 2023» (CM & LTP 2023), Ukraine, Kharkov, June 5-11, 2023.
 9. **S. Cherednychenko**, N. Vinnikov, V. Boiko, G. Dovbeshko, A. Dolbin, “Spectroscopic and electrophysical studies of a solution of fullerene C₆₀ molecules in water” in Book of Abstract of the 8th International Conference «NANOBIOPHYSICS: Fundamental and Applied Aspects» (NBP 2023), Ukraine, Kyiv, October 3-6, 2023.



Сергій ЧЕРЕДНИЧЕНКО