

Огляд

<https://doi.org/10.26565/2075-3810-2019-42-06>

УДК 577.32:577.338

МОЛЕКУЛЯРНІ МЕХАНІЗМИ ВПЛИВУ ПОВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНІВ НА БІОЛОГІЧНІ СТРУКТУРИ

М.І. Суховія, С.Е. Бірдус, М.І. Шафраньош, Ю.Ю. Свида, І.І. Шафраньош

Ужгородський національний університет, пл. Народна, 3, м. Ужгород, Україна, 88000

e-mail: misshafr@gmail.com

Надійшла до редакції 29 жовтня 2018 р.

Прийнята 19 грудня 2018 р.

Актуальність. У статті наведено огляд біофізичних досліджень, виконаних науковцями Закарпатського відділення Українського біофізичного товариства, який присвячується світлій пам'яті видатного українського біофізика, професора Юрія Павловича Благого.

Мета роботи – з'ясування особливостей фізичних процесів та структурних змін у молекулах нуклеїнових кислот, ініційованих низькоенергетичними електронами (10^{-1} - 10^2 eV).

Матеріали і методи. Об'єктами дослідження було обрано молекулярні компоненти нуклеїнових кислот – азотисті основи, нуклеозиди. Застосовано комплекс методів: спектральний метод для вивчення люмінесценції біомолекул, збуджених електронним ударом; електричний метод при визначенні повних перерізів утворення позитивних і негативних іонів; метод газозфазної мас-спектрометрії з іонізацією електронним ударом для встановлення продуктів взаємодії повільних електронів з біомолекулами. Більшість експериментів було проведено в умовах пучків електронів та молекул, що перетинаються.

Результати. Досліджено процеси збудження, іонізації та фрагментації молекулярних складових нуклеїнових кислот електронним ударом. Отримано спектри випромінювання біомолекул в області довжин хвиль 200-500 нм для різних енергій налітаючих електронів. Для ідентифікації спектральних смуг детально досліджено відповідні функції збудження, визначено енергетичні пороги процесів, здійснено мас-спектрометричний аналіз з іонізацією біомолекул електронним ударом, проведено квантово-хімічні напівемпіричні розрахунки параметрів їх структури. Встановлено, що складна суперпозиційна природа спектрів відображає одночасне протікання різних фізичних процесів. Зокрема, крім прямого збудження синглетних і триплетних станів молекул основ, наявне дисоціативне збудження та збудження іонізованих біомолекул і їх фрагментів. Аналіз функцій збудження показав наявність інтеркомбінаційних переходів з утворенням триплетних метастабільних станів молекул основ нуклеїнових кислот. Важливо, що процеси появи негативних іонів мають резонансний характер і супроводжуються дисоціацією молекул навіть при енергіях, менших за пороги збудження та іонізації.

Висновки. Досліджено фізичні процеси, ініційовані впливом низькоенергетичного випромінювання у біоорганічних структурах, та їхні біофізичні наслідки. Зокрема, показано, що електрони, змінюючи фізичну структуру нуклеотидних основ, навіть при невеликих енергіях можуть викликати появу точкових мутацій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: нуклеїнові кислоти; азотисті основи; низькоенергетичні електрони; мас-спектрометрія; спектроскопія.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВЛИЯНИЯ МЕДЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

М.И. Суховия, С.Э. Бирдус, М.И. Шафраньош, Ю.Ю. Свида, И.И. Шафраньош

Ужгородский национальный университет, пл. Народная, 3, г. Ужгород, Украина, 88000

Актуальность. В статье приведен обзор исследований, выполненных биофизиками Закарпатского отделения Украинского биофизического общества, посвященный светлой памяти выдающегося украинского биофизика, профессора Юрия Павловича Благого.

Цель работы – выяснение особенностей физических процессов и структурных изменений в молекулах нуклеиновых кислот, иницированных низкоэнергетическими электронами (10^{-1} - 10^2 эВ).

Материалы и методы. Объектами исследования были выбраны молекулярные компоненты нуклеиновых кислот – азотистые основания, нуклеозиды. Применен комплекс методов: спектральный метод для изучения люминесценции возбужденных электронным ударом молекул;

электрический метод при определении полных сечений образования положительных и отрицательных ионов; метод газовой масс-спектрометрии с ионизацией электронным ударом. Большинство экспериментов были проведены в условиях пересекающихся пучков электронов и молекул.

Результаты. Исследованы процессы возбуждения, ионизации и фрагментации молекул азотистых оснований нуклеиновых кислот электронным ударом. Измерены спектры излучения биомолекул в области длин волн 200-500 нм при разных энергиях налетающих электронов. Для идентификации спектральных полос исследованы функции возбуждения нуклеотидных оснований, осуществлен масс-спектрометрический анализ с ионизацией биомолекул электронным ударом, проведены квантово-химические полумпирические расчеты параметров их структуры. Установлено, что сложная суперпозиционная природа спектров отражает протекание различных физических процессов. Кроме прямого возбуждения синглетных и триплетных состояний молекул оснований, происходит диссоциативное возбуждение и возбуждение ионизированных биомолекул и их фрагментов. Анализ функций возбуждения показал наличие интеркомбинационных переходов с образованием триплетных метастабильных состояний молекул оснований нуклеиновых кислот. Показано, что процессы появления отрицательных ионов имеют резонансный характер и сопровождаются диссоциацией молекул даже при энергиях, меньших порогов возбуждения и ионизации.

Выводы. Исследованы физические процессы, инициированные влиянием низкоэнергетического излучения в биоорганических структурах, и их биофизические следствия. В частности, показано, что электроны, изменяя физическую структуру нуклеотидных оснований, даже при небольших энергиях могут вызывать появление точечных мутаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нуклеиновые кислоты; азотистые основания; низкоэнергетические электроны; масс-спектрометрия; спектроскопия.

MOLECULAR MECHANISMS OF INFLUENCE OF SLOW ELECTRONS ON BIOLOGICAL STRUCTURES

M.I. Sukhoviya, S.E. Birdus, M.I. Shafranyosh, Yu.Yu. Svida, I.I. Shafranyosh

Uzhgorod National University, 3 Narodna Sq., Uzhgorod, Ukraine, 88000

Background: The article reviews investigations carried out by biophysicists of the Transcarpathian Branch of the Ukrainian Biophysical Society, dedicated to the memory of the prominent Ukrainian biophysicist, Professor Yuri Pavlovich Blagoi.

Objectives: Study of the peculiarities of physical processes and structural changes in nucleic acid molecules initiated by low-energy electrons (10^{-1} - 10^2 eV).

Materials and methods: Molecular components of nucleic acids – nucleobases, nucleosides – were chosen as objects of research. A complex of methods is applied: the spectral method for obtaining the luminescence spectra of molecules excited by an electron impact; the electric method in determining the complete cross-sections of the formation of positive and negative ions; the method of gas-phase mass spectrometry with electron impact ionization. A new approach is proposed, which is based on the development of the methods for obtaining biomolecules in an isolated (gas) state, the formation of molecular beams, and the implementation of a crossed electron and molecular beams method.

Results: The processes of excitation, ionization and fragmentation of molecules of nucleic acid bases under electron impact are investigated. The radiation spectra of biomolecules in the wavelength region from 200 nm to 500 nm for different energies of incident electrons are obtained. For identification of spectral bands, the excitation functions of biomolecules are investigated, mass spectrometry analysis of the bases is performed, semi-empirical quantum-chemical calculations of structural parameters are carried out. It is established that the complex superpositional nature of the spectra reflects the simultaneous occurrence of various physical processes, including, in addition to the direct excitation of the singlet and triplet states of the base molecules, the dissociation excitation and excitation of ionized biomolecules and their fragments. The analysis of the excitation functions shows the presence of intersystem transitions with the formation of triplet metastable states of the nucleic acid bases molecules. It is shown that the processes of the appearance of negative ions are of resonant nature and are accompanied by the dissociation of molecules even at energies smaller than the thresholds for excitation and ionization.

Conclusions: It is established that physical processes initiated by the influence of low-energy radiation in bioorganic structures lead to various biophysical consequences. In particular, the electrons destroying the molecules of the bases, may cause the appearance of point mutations.

KEY WORDS: nucleic acids; nucleobases; low energy electrons; mass spectrometry; spectroscopy.

Вивчення фізичних процесів і біофізичних наслідків, викликаних низькоенергетичними електронами в біоструктурах, є важливим з декількох причин.

По-перше, це актуальність проблеми внутріклітинного опромінення вторинними електронами, які утворюються у значній кількості в речовині при дії високоенергетичного випромінювання різних видів. Саме з повільними електронами з енергією (10^{-1} - 10^2) еВ пов'язують основні деструктивні зміни на молекулярному рівні біоб'єктів. При цьому головною мішенню стають генетичні макромолекули. Збудження, міграція енергії та іонізація молекул у біоструктурах зумовлюють радіаційні зміни у клітинах живих організмів.

По-друге, за допомогою монокінетичного пучка низькоенергетичних електронів регульованих енергій можна отримати фундаментальну інформацію не лише про оптично дозволені переходи між станами електронної системи молекул, але і про пряме збудження інтеркомбінаційних переходів. У результаті цього ефективно виникатимуть метастабільні триплетні стани молекул, які завдяки своїм фізичним особливостям відіграють виняткову роль у реалізації первинних фізичних стадій складних біологічних процесів (наприклад, біоенергетичних перетворень, фотосинтезу, ферментативного каталізу, а також деструктивних реакцій і навіть канцерогенезу). Не виключено, що ці взаємодії можуть стосуватися й такої унікальної проблеми, як абіогенний синтез біомолекул під впливом електронної похідної космічного випромінювання.

Ефективним способом вивчення механізмів таких процесів може бути фізичне моделювання передачі біосистемам певної кількості енергії від 0 до 20 еВ, тобто в області, де знаходяться нижні синглетні й триплетні збуджені рівні та потенціали (енергії) іонізації біомолекул. Тому для вирішення багатьох важливих завдань в області біофізики, медицини та екології необхідна інформація про молекулярні механізми впливу випромінювання малих енергій на біомолекули, особливо ДНК і РНК, які є носіями спадкової інформації.

Пріоритетні дослідження взаємодії низькоенергетичних електронів з біоструктурами розпочалися на фізичному факультеті Ужгородського державного (зараз національного) університету ще у 80-х роках минулого сторіччя [1, 2]. Слід відмітити, що на кафедрі біофізики університету вивчався також вплив високоенергетичних випромінювань на клітини і біомолекули [3, 4].

Як біологічно значимий об'єкт для низькоенергетичних взаємодій були вибрані азотисті основи нуклеїнових кислот, молекули яких виявилися оптимальною фізичною моделлю для таких дослідів [5]. Поступ у цьому напрямку зумовлений наступними методично-експериментальними досягненнями. Це, насамперед, розробка методики отримання біомолекул в ізольованому (газовому) стані. Такий підхід дозволяє вивчати явища, які реалізуються за прямим механізмом, тобто завдяки поглинанню енергії самими молекулами, що дає змогу зменшити вплив середовища і міжмолекулярних взаємодій. Наступні кроки – розробка способів формування молекулярних пучків і їх перетину з електронним пучком. Важливим етапом було удосконалення джерел електронів, що дало змогу отримати пучки електронів регульованих енергій з монокінетичністю 0,3-0,01 еВ. Так були створені передумови для прямого вивчення фізичних процесів, викликаних у біомолекулах електронним ударом в області енергій від десятих часток до десятків електронвольт.

Важливо відмітити, що перші презентації і обговорення отриманих результатів відбувались на біофізичних конференціях і з'їздах у місті Харкові. Автори з вдячністю згадують цінні консультації та допомогу, надану професором Юрієм Павловичем Благим і його колегами.

МАТЕРІАЛИ Й МЕТОДИ

Об'єктами дослідження були молекулярні компоненти нуклеїнових кислот – азотисті основи, нуклеозиди.

Застосовано комплекс методів: спектральний метод для отримання спектрів випромінювання (люмінесценції) збуджених молекул і для вимірювання функцій збудження (енергетичних залежностей перерізів збудження); електричний метод при визначенні повних перерізів утворення позитивних і негативних іонів та їх енергетичних залежностей; метод газофазної мас-спектрометрії з іонізацією електронним ударом для встановлення продуктів взаємодії повільних електронів з біомолекулами; оптичний метод для визначення концентрації молекул у пучку. Для досягнення мети та завдань досліджень більшість цих експериментів було проведено в умовах пучків електронів та молекул, що перетинаються. Такий підхід забезпечив мінімізацію впливу середовища на процес вимірів абсолютних значень перерізів іонізації молекул та гарантував високу точність і надійність отриманих результатів. Квантово-хімічні методи AM1, PM3 застосовано для розрахунків фізичних параметрів молекулярних складових нуклеїнових кислот.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

За допомогою оригінальних експериментальних методичних розробок вперше отримано інформацію про закономірності процесів збудження, іонізації та деструкції біомолекул азотистих основ нуклеїнових кислот повільними монокінетичними електронами в діапазоні енергій від 0 до 200 еВ. Основні результати опубліковано у серії робіт [5-30].

В експериментах з електронним пучком отримано спектри люмінесценції молекул нуклеотидних основ: цитозину, тиміну, урацилу, гуаніну та аденіну і продуктів їх дисоціативного збудження в області від 200 до 600 нм [5-11]. Досліджено енергетичні залежності перерізів збудження (функції збудження) спектральних молекулярних смуг у максимумі та проаналізовано їхні особливості: енергетичні пороги, форму функцій, положення максимумів. Показано наявність інтеркомбінаційних переходів з утворенням триплетних метастабільних станів молекул основ нуклеїнових кислот. Тобто виявлено пряме збудження електронним ударом триплетних метастабільних станів молекул нуклеотидних основ. На основі аналізу функцій збудження та іонізації, мас-спектрометричних вимірів та квантово-механічних розрахунків здійснено ідентифікацію інтенсивних смуг в емісійних спектрах молекул нуклеотидних основ. Показано, що найбільш інтенсивні смуги із максимумами при 275-290 нм зумовлені радіаційним розпадом першого збудженого електронно-коливного стану молекулярного іона в його основний стан. Більша частина спектральних артефактів пов'язана із процесами дисоціативного збудження.

Досліджено особливості процесів іонізації молекулярних компонентів нуклеїнових кислот електронним ударом. Так, експериментальним шляхом визначено абсолютні величини та енергетичні залежності повних перерізів утворення позитивних іонів (функції іонізації) молекул аденіну, гуаніну, цитозину, тиміну та урацилу в інтервалі енергій електронів від порогу процесу до 200 еВ [12-25]. У діапазоні енергій електронів 8-10 еВ виміряні енергетичні пороги утворення позитивних іонів (потенціали іонізації) для цитозину, тиміну, урацилу, аденіну та гуаніну. Максимальна ймовірність іонізації молекул спостерігалась в області 73-95 еВ і є дещо вищою для пуринових основ. На основі мас-спектрів, отриманих для азотистих основ нуклеїнових кислот, запропоновано схеми фрагментації молекул. Виміряно перерізи (ймовірності) утворення іонних фрагментів нуклеотидних основ та досліджено їхні залежності від

енергії електронів. Показано, що найбільші перерізи утворення $\sim 10^{-16} \text{ см}^2$ властиві молекулярним іонам.

Вивчено процес утворення негативних іонів молекулярних компонентів нуклеїнових кислот в інтервалі енергій електронів 0-12 eV [14, 19-21, 26-30]. У прямому експерименті визначено абсолютні величини та енергетичні залежності повних перерізів утворення негативних іонів молекул цитозину, тиміну, урацилу, аденіну та гуаніну. Показано, що процеси утворення негативних іонів при зіткненнях повільних електронів з молекулами нуклеотидних основ мають нелінійний резонансний характер і реалізуються при надзвичайно малих енергіях електронів 1-3 eV. На основі співставлення теоретичних розрахунків характеристик нейтральної та аніонної форм компонентів нуклеїнових кислот із експериментальними результатами визначено домінуючі канали дисоціації негативних іонів біомолекул. Аніоноутворення, яке моделює електронне захоплення, супроводжується збуренням коливної структури, що вказує на реалізацію у даних сполуках механізмів коливально-збудженого Фешбахівського резонансу.

Важливим є той факт, що у провідних наукових виданнях світу зростає низка публікацій вчених з відомих дослідницьких груп (див. наприклад [31-33]), що є ще одним вагогим доказом актуальності даної проблеми.

Фізичні процеси збудження, іонізації та фрагментації молекул [30], ініційовані впливом низькоенергетичних електронів (10^{-1} - 10^2 eV), у біоорганічних структурах можуть спричинити різноманітні біофізичні наслідки. Зокрема, електрони, руйнуючи молекули основ, викликають появу точкових мутацій: делецій, трансверсій, транзицій, заміну кодонів. Порушення процесів транскрипції і трансляції може спричинити генотоксичні і мутагенні ефекти у клітинах, генетичні і соматичні зміни організму. Збільшення кількості іонізованих біомолекул та їх фрагментів підвищуватиме чутливість живих клітин до зовнішніх електромагнітних полів. Важливо, що найбільші перерізи утворення $\sim 10^{-16} \text{ см}^2$ при енергії електронів 70-95 eV властиві іонам цілих молекул основ, а не фрагментам. Це свідчить про відносну стабільність еволюційно вибраних молекулярних носіїв генетичної інформації.

ВИСНОВКИ

У статті представлено огляд результатів комплексного дослідження фізичних процесів і структурних змін, ініційованих у молекулярних складових нуклеїнових кислот повільними монокінетичними електронами енергіями від 0,1 eV до десятків електронвольт. Отримані результати мають пріоритетний характер. Так, вперше вивчено особливості збудження та іонізації молекул аденіну, тиміну, гуаніну, цитозину та урацилу електронним ударом. Виміряно енергетичні залежності перерізів (ймовірностей) цих процесів. Створено фізичні і математичні моделі для оцінки біофізичних наслідків низькоенергетичних взаємодій. Зокрема, показано, що електрони, змінюючи фізичну структуру нуклеотидних основ, навіть при невеликих енергіях можуть викликати появу точкових мутацій різних видів. Експериментально встановлений факт про резонансну деградацію біомолекул при припорогових електронних енергіях є перспективним для розробки нових методів радіосенсибілізації, для оптимізації радіотерапевтичних методик, цілеспрямованого радіаційного мутагенезу, для сучасних нанотехнологій.

ПОДЯКА

Автори з глибокою вдячністю згадують видатного біофізика, професора Юрія Павловича Благого – його цінні поради при обговоренні результатів наших перших


експериментів, науковій консультації та постійну підтримку нашого наукового напрямку. Назавжди залишаться у пам'яті світлі зустрічі і бесіди з Юрієм Павловичем і його дружиною – Вірою Володимирівною (кандидатом біологічних наук, талановитою художницею).


КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ


Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.


Authors' ORCID ID

M.I. Sukhoviya  <https://orcid.org/0000-0003-0474-3293>

S.E. Birdus  <https://orcid.org/0000-0001-7299-3820>

M.I. Shafranyosh  <https://orcid.org/0000-0002-8556-2824>

Yu.Yu. Svida  <https://orcid.org/0000-0002-7800-5675>

I.I. Shafranyosh  <https://orcid.org/0000-0002-3113-8737>

REFERENCES

1. Sukhoviya, M.I., Shafranyosh, I.I. (1980). Excitation of the nucleic acids bases by low-energy electrons. In *Mechanisms of radiation damage and restoration of nucleic acids* (p. 51). Pushchino-on-Oka. (in Russian)
2. Sukhoviya, M.I., Shafranyosh, I.I. (1982). Peculiarities of the excited states formation of nucleic acid base molecules under slow electrons and laser radiation. *Abstracts of Papers. I Biophys. Congress. Moscow*, August 3-8, 1982. (Vol.4. p.76). (in Russian)
3. Sukhoviya, M.I. (1974). Dynamics of changes in the secondary luminescence of peripheral blood leukocytes after x-ray irradiation. *Radiobiology*, 14(3), 441-443. (in Russian)
4. Sukhoviya, M.I., Kovalchuk, A.V., Trifonov, E.N. (1975). Effect of ionizing electromagnetic radiation on DNA in solution and on white blood cells. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 225(5), 1202-1205. (in Russian)
5. Sukhoviya, M.I., Slavik, V.N., Shafranyosh, I.I., Shimon, L.L. (1991). Peculiarity of the interaction of nucleic acid base molecules with of low energies electrons. *Biopolymers and Cell*, 7(6), 77-82. (in Ukrainian)
6. Sukhoviya, M.I., Voshchepinec, E.I., Shafranyosh, I.I., Shimon, L.L. (1996). Excitation and ionization of adenine by electron impact. *Biopolymers and Cell*, 12(3), 97-100. (in Ukrainian)
7. Sukhoviya, M.I., Shafranyosh, M.I., Shafranyosh, I.I. (1999). Spectral investigation of the electron-impact excitation of the nucleic acid base molecules. In *Spectroscopy of Biological Molecules: New Directions* (pp. 281-282). Kluwer Academic Publishers (Dordrecht / Boston/ London)
8. Shafranyosh, I.I., Sukhoviya, M.I. (2007). Excitation of thymine molecules in the gas phase by electron impact. *Optics and spectroscopy*, 102(4), 553-555. (in Russian)
9. Shafranyosh, I.I., Stecovich, V.V., Chavarga, M.M., Sukhoviya, M.I. (2012). Excitation of luminescence of uracil molecules by electron impact. *Optics and spectroscopy*, 112(1), 39-43. (in Russian)
10. Svyda, Ju.Ju., Shafranyosh, M.I., Sukhoviya, M.I., Chavarga, M.M., Shafranyosh, I.I. (2016). Luminescence of guanine molecules in the gas phase under the electron beam. *Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics*, (39), 106-110. (in Ukrainian)
11. Shafranyosh, I.I., Mitropolskij, I.E., Kuzma, V.V., Svyda, Ju.Ju., Sukhoviya, M.I. (2018). Electron-Impact Excitation of Uracil Luminescence on a Ceramic Surface. *Journal of Applied Spectroscopy*, 85(1), 32-36. (in Russian). doi: 10.1007/s10812-018-0607-7
12. Volkova, S.E., Nebesny, F.I., Slavik, V.N., Sukhoviya, M.I., Chavarga, M.M., Shafranyosh, I.I., Shimon, L.L. (1989). Mass spectrometry studies of nucleic acid bases. *Abstracts of Papers. Conf. on the application of mass spectrometry in biology and medicine*. Kharkov, 1989. (pp.109-110). (in Russian)
13. Sukhoviya, M.I., Shafranyosh, I.I., Shimon, L.L. (1999). Investigation of the excitation and ionization of nucleic acid bases by electron impact. *Visnyk Kharkivskogo universytetu, №434, Biophysical bulletin*, 3(1), 39-41. (in Russian)
14. Shafranyosh, I.I., Sukhoviya, M.I., Shafranyosh, M.I. (2006). Absolute cross sections of positive and negative ions production in electron collision with cytosine molecules. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, (39), 4155-4162. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-4075/39/20/013>
15. Shafranyosh, I.I., Petrushko I.A., Slavik, V.N., Sukhoviya, M.I. (2000) .Structural changes of nucleic acid bases caused by low-energy electrons. *Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics*, (6), 259-263. (in Ukrainian)
16. Sukhoviya, M.I. (2001). Physical processes in biomacromolecules caused by electron impact and their biophysical role. *Visnyk Kharkivskogo universytetu, №2525, Biophysical bulletin*, 1(8), 34-36. (in Ukrainian)

17. Sukhoviya, M.I., Shimon, L.L., Shafranyosh, M.I., Margitych, M.O., Shafranyosh, I.I., (2006). Experimental determination of cross sections formation of the cytosine molecule positive ions and its fragments by slow electrons. *Visnyk Kharkivskogo universytetu, № 716, Biophysical bulletin*, 2(16), 19-24. (in Ukrainian)
18. Sukhoviya, M.I., Medulych, V.V., Shafranyosh, I.I. (2007). Ionization of uracil molecules by electron impact. *Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics*, (20), 46-49. (in Ukrainian)
19. Shafranyosh I.I., Sukhoviya, M.I., Shafranyosh, M.I., Shimon L.L. (2008). Formation of positive and negative ions of thymine molecules under the action of slow electrons. *Technical Physics*, 53(12), 1536-1540. doi: 10.1134/S1063784208120025
20. Shvab, R.L., Shafranyosh, M.I., Stecovich, V.V., Sukhoviya, M.I., Shafranyosh, I.I. (2009). Formation of positive and negative ions of adenine molecules caused by slow electrons. *Scientific Herald of Uzhhorod University. Series Physics*, (25), 195-201. (in Ukrainian)
21. Shvab, R.L., Mynda, V.V., Stecovich, V.V., Stukalov, O.M., Sukhoviya, M.I., Shafranyosh, I.I. (2010). Experimental and quantum-chemical modeling of formation processes of positive and negative adenine ions by electron impact. *Cherkasy University Bulletin: Chemical Sciences*, (175), 54-57. (in Ukrainian)
22. Stecovich, V.V., Pavluchok-Gogorchak, O.V., Sukhoviya, M.I., Shvab, R.L., Shafranyosh, I.I. (2010). About radiobiological significance of slow electrons. *Uzhhorod University Scientific Herald. Series Biology*, (27), 198-201. (in Ukrainian)
23. Shafranyosh, I.I. and Sukhoviya, M.I. (2012). Inelastic collisions of the uracil molecules with electrons. *J. Chem. Phys.*, 137(18), 184303-1-184303-6. doi: 10.1063/1.4765307
24. Sukhoviya, M.I., Shafranyosh M.I., Chavarga M.M., Shafranyosh I.I. (2012). Electron impact ionization and excitation of uracil molecules. *Ukr. J. Phys.*, 57(7), 752-760
25. Shafranyosh, M.I., Zhygan, A.V., Svyda, Ju.Ju., Sukhoviya, M.I., Shafranyosh, I.I., Minaev, B.F., Baryshnikov, G.V., Minaeva, V.A. (2014). Ionization of guanine molecules in collisions with electrons. *Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics*, (36), 137-143. (in Ukrainian)
26. Shafranyosh, I.I., Svyda, Ju.Ju., Sukhoviya, M.I., Shafranyosh, M.I., Minaev, B.F., Baryshnikov, G.V., Minaeva, V.A. (2015). Absolute effective cross sections of ionization of adenine and guanine molecules by electron impact. *Technical Physics*, 85(10), 16-22. (in Russian). doi: 10.1134/S1063784215100278
27. Sukhoviya, M.I., Shafranyosh, M.I., Margitych, M.O., Shafranyosh, I.I. (2005). Negative ions formation of the cytosine molecule by electron impact. *Biopolym. Cell.*, 21(6), 531-535. doi: 10.7124/bc.000711
28. Shafranyosh, M.I., Sukhoviya, M.I., Shimon, L.L., Shafranyosh, I.I. (2005). Absolute cross sections for the electron-impact formation of cytosine anions. *Tech. Phys. Let.*, 31(12), 1071-1073. doi: 10.1134/1.2150902
29. Shafranyosh, M.I., Sukhoviya, M.I., Shimon, L.L., Shafranyosh, I.I. (2008). Resonance formation of negative ions of uracil molecules. *Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics*, (23), 85-90. (in Ukrainian)
30. Minaev, B.F., Shafranyosh, M.I., Svyda, Ju.Ju., Sukhoviya, M.I., Shafranyosh, I.I., Minaev, B.F., Baryshnikov, G.V., Minaeva, V.A. (2014). Fragmentation of the adenine and guanine molecules induced by electron collisions. *J. Chem. Phys.*, 140(17), 175101-1-175101-15. doi: 10.1063/1.4871881
31. Aflatooni, K., Scheer, A.M., Burrow, P.D. (2006). Total dissociative electron attachment cross sections for molecular constituents of DNA. *J. Chem. Phys.*, 125(5), 054301-1 – 054501-5. doi: 10.1063/1.2229209
32. Huber, D., Beikircher, S., Denifl, M., Zappa, F., Matejcik, S., Märk, T.D. and Scheier, P. (2006). High resolution dissociative electron attachment to gas phase adenine. *J. Chem. Phys.*, 125(8), 084304-1-084304-7. doi: 10.1063/1.2336775
33. Van der Burgt, P.M., Finnegan, S. and Eden, S. (2015). Electron impact fragmentation of adenine: partial ionization cross sections for positive fragments. *Eur. Phys. J. D.*, 69(1), 173-181. doi: 10.1140/epjd/e2015-60200-y