

ISSN 2075-3810 (print)
ISSN 2075-3829 (online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Біофізичний Вісник

Випуск 47

Заснований 1998 р.

Харків 2022

Біофізичний вісник публікує наукові статті, короткі повідомлення та огляди, які містять оригінальні результати розв'язання фізико-математичних та інженерно-технічних проблем, що відносяться до біологічних систем різного рівня організації, методами експериментальної і теоретичної фізики, математичного та комп'ютерного моделювання. Журнал виходить 2 рази на рік.

Свідоцтво про державну реєстрацію: KB № 11007 від 17.02.2006.

ISSN 2075-3829 (Online)

ISSN 2075-3810 (Print)

Біофізичний вісник є фаховим виданням України категорії «Б» у галузях наук: 10 Природничі науки за спеціальностями 104 Фізика та астрономія, 105 Прикладна фізика та наноматеріали; 09 Біологія за спеціальністю 091 Біологія; 16 Хімічна та біоінженерія за спеціальністю 163 Біомедична інженерія (Наказ Міністерства освіти і науки України № 1643 від 28.12.2019).

Всі статті проходять внутрішнє та зовнішнє подвійне сліпе рецензування.

Номер затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 10 від 27.06.2022).

Журнал має Digital Object Identifier: **10.26565/2075-3810**.

Головний редактор

Косевич М. В., д.ф.-м.н., с.н.с., п.н.с., Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України, Харків, Україна – головний редактор

Заступник головного редактора

Катрич В. О., д.ф.-м.н., професор, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Відповідальний секретар

Берест В. П., д.ф.-м.н., доцент, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Члени редколегії

Аврунін О. Г., професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Andrushchenko V., PhD, Senior Scientist, Institute of Organic Chemistry and Biochemistry Czech Academy of Science, Prague, Czech Republic

Bednarczyk P., Dr. hab., Assistant professor, Warsaw University of Life Sciences, Poland

Binder H., PhD, Dr. rer. nat. habil., Universität Leipzig, Germany

Burkina V., PhD, Researcher, University of South Bohemia in Czech Republic

Вашенко О. В., д.ф.-м.н., с.н.с., п.н.с., Інститут скінтиляційних матеріалів Національної академії наук України, Харків, Україна

Горбенко Г. П., д.ф.-м.н., професор, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

Гордієнко О. І., д.ф.-м.н., професор, зав. відділу, Інститут проблем кріобіології та кріомедицини Національної академії наук України, Харків, Україна

Гуцол Т. Д., д.т.н., професор, Поліський національний університет, Житомир, Україна

Довбешко Г. І., д.ф.-м.н., професор, Інститут фізики Національної академії наук України, Київ, Україна

Domanov Ye. A., PhD, Head of Skin Biophysics Group, L'Oréal Research & Innovation, Aulnay-sous-Bois, France

Zamaratskaia G., PhD, Associate Professor, Senior Lecturer, Swedish University of Agricultural Sciences, Sweden

Жолос О. В., д.б.н., професор, зав. каф., Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Злепко С. М., д.т.н., професор, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна

Кавок Н. С., к.б.н., с.н.с., Інститут скінтиляційних матеріалів Національної академії наук України, Харків, Україна

Карачевцев В. О., д.ф.-м.н., професор, член-кор. НАН України, Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків, Україна

Корнелюк О. І., д.б.н., професор, член-кор. НАН України, зав. відділу, Інститут молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, Київ, Україна

Лисецький Л. М., д.ф.-м.н., професор, п.н.с., Інститут скінтиляційних матеріалів Національної академії наук України, Харків, Україна

Ніколов М. О., к.т.н., с.н.с., доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Павлов С. В., д.т.н., професор, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна

Попов А. О., к.т.н., доцент, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Reva I., PhD, Dr. Hab., Investigador Principal, Departamento de Quimica, Universidade de Coimbra, Portugal

Rutkauskas D., Ph.D., Senior Researcher, Centre for Physical Sciences and Technology, Vilnius, Lithuania

Соляник Г. І., д.ф.-м.н., професор, Інститут експериментальної патології, онкології та радіобіології ім. Р.С. Кавецького Національної академії наук України, Київ, Україна

Степаньян С. Г., д.ф.-м.н., с.н.с., Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна Національної академії наук України, Харків, Україна

Štys D., Prof. RNDr. CSc. Institute of Complex Systems FFPW, University of South Bohemia, Czech Republic

Ткачук Р. А., д.т.н., професор, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна

Томашевський Р. С., д.т.н., професор, директор навчально-наукового інституту, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Трусова В. М., д.ф.-м.н., професор, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Feldman Y., Prof., PhD (Phys. & Math.), Director Dielectric Spectroscopy LAB, The Hebrew University of Jerusalem, Israel

Шестопалова Г. В., д.ф.-м.н., професор, Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України, Харків, Україна

Шуба Я. М., д. б. н., професор, академік НАН України, зав. відділу, Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця Національної академії наук України, Київ, Україна;

Yakovenko S., PhD, Associate Professor, West Virginia University, School of Medicine, USA

Горобченко О. О., к.ф.-м.н., доцент, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна – *технічний редактор*

Жигалова Н. М., інженер I кат., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна – *технічний секретар*

Біофізичний вісник індексується: Національною бібліотекою України імені В. І. Вернадського; Scopus; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Бібліографічною базою даних WorldCat; CAS (Chemical Abstracts Service); Google Scholar; Ulrichsweb; Bielefeld Academic Search Engine (BASE).

Адреса редколегії та видавництва:

Кафедра молекулярної і медичної біофізики,
Факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна

Tel: +38-057-707-55-76

E-mail: biophys-visnyk@karazin.ua

Web-page: <http://periodicals.karazin.ua/biophysvisnyk>

ISSN 2075-3810 (print)
ISSN 2075-3829 (online)

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
V. N. Karazin Kharkiv National University

Biophysical Bulletin

Issue 47

Founded in 1998

Kharkiv 2022

Biophysical Bulletin publishes original scientific articles, short communications and reviews dealing with physical, mathematical, and engineering problems pertaining to biological systems and solved by methods of experimental and theoretical physics, mathematical modeling and computer simulation. The journal is published twice a year.

Certificate of state registration: KB № 11007 of 17.02.2006.

ISSN 2075-3829 (Online) **ISSN 2075-3810** (Print)

All manuscripts are double blind peer-reviewed by at least two reviewers.

Approved for publication by the Academic Council of V. N. Karazin Kharkiv National University (June 27, 2022, Protocol No. 10).

Biophysical Bulletin has Digital Object Identifier: **10.26565/2075-3810**.

Editor-in-Chief

M. V. Kosevich, Dr. Sci. (Phys. & Math.), B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of The National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

Deputy Editor-in-Chief

V. A. Katrich, Prof., Dr. Sci. (Phys. & Math.), V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Executive Secretary

V. P. Berest, Dr. Sci. (Phys. & Math.), V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Editorial Board

O. G. Avrunin, Dr. Sci. (Engin.), Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

V. Andrushchenko, PhD, Senior Scientist, Institute of Organic Chemistry and Biochemistry Czech Academy of Science, Prague, Czech Republic

P. Bednarczyk, Dr. hab., Assistant professor, Warsaw University of Life Sciences, Poland

H. Binder, PhD, Dr. rer. nat. habil., Universität Leipzig, Germany

V. Burkina, PhD, Researcher, University of South Bohemia in Czech Republic

O. V. Vashchenko, Dr. Sci. (Phys. & Math.), Institute for Scintillation Materials of NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

G. P. Gorbenko, Prof. Dr. Sci. (Phys. & Math.), V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

O. I. Gordienko, Prof. Dr. Sci. (Phys. & Math.), head Department, Institute for Problems of Cryobiology and Cryomedicine of The National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

T. D. Hutsol, Prof. Dr. Sci. (Engin.), Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine

G. I. Dovbeshko, Prof. Dr. Sci. (Phys. & Math.), Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Ye. A. Domanov, PhD, Head of Skin Biophysics Group, L'Oréal Research & Innovation, Aulnay-sous-Bois, France

G. Zamaratskaia, PhD, Associate Professor, Senior Lecturer, Swedish University of Agricultural Sciences, Sweden

A. V. Zholos, Prof. Dr. Sci. (Biol.), head Chair, Taras Shevchenko National University Kyiv, Ukraine

S. M. Zlepko, Dr. Sci. (Engin.), Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

N. S. Kavok, PhD (Biol.), senior researcher, Institute for Scintillation Materials of The National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

V. A. Karachevtsev, Prof. Dr. Sci. (Phys. & Math.), Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, B. I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

A. I. Kornelyuk, Prof. Dr. Sci. (Biol.), Head of Department, Institute of Molecular Biology and Genetics of The National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

L. N. Lysetskyi, Prof. Dr. Sci. (Phys. & Math.), leading research fellow, Institute for Scintillation Materials of The National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

N. A. Nikolov, PhD (Engin.), senior researcher, associate professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine

S. V. Pavlov, Dr. Sci. (Engin.), Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

A. A. Popov, PhD (Engin.), Associate professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" disabled, Kyiv, Ukraine

I. Reva, PhD, Dr. Hab., Investigator Principal, Departamento de Quimica, Universidade de Coimbra, Portugal

Danielis Rutkauskas, PhD, Senior Researcher, Centre for Physical Sciences and Technology, Vilnius, Lithuania

G. I. Solyanik, Prof. Dr. Sci. (Phys. & Math.), R. E. Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiobiology, Kiev, Ukraine, Ukraine

S. G. Stepanian, Dr. Sci. (Phys. & Math.), B. I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of The National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

D. Štys, Prof. RNDr. CSc. Institute of Complex Systems FFPW, University of South Bohemia, Czech Republic

R. A. Tkachuk, Dr. Sci. (Engin.), Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

R. S. Tomashevskiy, Prof. Dr. Sci. (Engin.), Director of the Educational and Scientific Institute, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" disabled, Kharkiv, Ukraine

V. M. Trusova, Prof. Dr. Sci. (Phys. & Math.), V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Y. Feldman, Prof., PhD (Phys. & Math.), Director Dielectric Spectroscopy LAB, The Hebrew University of Jerusalem, Israel

A. V. Shestopalova, Prof. Dr. Sci. (Phys. & Math.), O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

Y. M. Shuba, Prof. Dr. Sci. (Biol.), Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of the Department, Bogomolets Institute of Physiology disabled of The National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

S. Yakovenko, PhD, Associate Professor, West Virginia University, School of Medicine, USA

O. A. Gorobchenko, PhD (Phys. & Math.), V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine – *Technical Editor*

N. M. Zhyhalova, V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine – *Technical Secretary*

Biophysical Bulletin is indexed in: Vernadsky National Library of Ukraine; Scopus; Directory of Open Access Journals (DOAJ); WorldCat; CAS (Chemical Abstracts Service); Google Scholar; Ulrichsweb; Bielefeld Academic Search Engine (BASE)

Editorial Office and Publisher:

Department of Molecular and Medical Biophysics
School of Radio Physics, Biomedical Electronics and Computer Systems
V. N. Karazin Kharkiv National University,
4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

Tel: +38-057-707-55-76

E-mail: biophys-visnyk@karazin.ua

Web-page: <http://periodicals.karazin.ua/biophysvisnyk>

© V. N. Karazin Kharkiv National University, 2022

© I. R. Grytsaj, S. M. Mandzynets, M. V. Bura, the photographs of a loach embryo on the first page of the cover, 2022

ЗМІСТ

РЕДАКЦІЙНА СТАТТЯ

- V. A. Karachevtsev, M. V. Kosevich, G. I. Dovbeshko**
7th international conference NBP-2022 “Nanobiophysics: fundamental and applied aspects” 7–12

ДІЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ

- I. Р. Грицай, С. М. Мандзинець, М. В. Бура**
Вплив фториду натрію на розвиток та виживання зародків в'юна 13–26
- В. В. Жмурко, О. О. Авксентьева, Є. Д. Батуєва**
Фотоморфогенез та вміст вуглеводів в осьових органах проростків гороху посівного за дії селективного світла 27–39
- В. С. Мартинюк, Ю. В. Цейслер**
Вплив імпульсних магнітних полів наднизьких частот на H_2O_2 - та Fe^{2+} -індуковане вільнорадикальне окиснення ліпідів в ліпосомальних суспензіях 40–50

ХРОНІКА

- С. О. Мамілов**
XIV Міжнародна конференція по біоніці і прикладній біофізиці 51
- О. S. Mankovska**
All-Ukrainian conference on molecular and cell biology with international participation, dedicated to the heroic struggle of the Ukrainian people against the russian invaders 52–58
- Редакція «Біофізичного вісника»**
Надія у скрутні часи 59

CONTENTS**EDITORIAL**

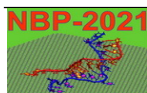
- V. A. Karachevtsev, M. V. Kosevich, G. I. Dovbeshko**
7th international conference NBP-2022 “Nanobiophysics: fundamental and applied aspects” 7–12

ACTION OF PHYSICAL AGENTS ON BIOLOGICAL OBJECTS

- I. R. Grytsaj, S. M. Mandzynets, M. V. Bura**
Influence of the sodium fluoride on the development and survival of the loach embryos 13–26
- V. V. Zhmurko, O. O. Avksentieva, Y. D. Batuieva**
Photomorphogenesis and content of carbohydrates in the axial organs of field pea seedlings under the influence of selective light 27–39
- V. S. Martynyuk, Yu. V. Tseyslyer**
Influence of impulse magnetic fields of extremely low frequencies on H₂O₂- and Fe²⁺-induced free radical lipid oxidation in liposomal suspensions 40–50

CHRONICLE

- S. O. Mamilov**
XIV International conference on bionics and applied biophysics 51
- O. S. Mankovska**
All-Ukrainian conference on molecular and cell biology with international participation, dedicated to the heroic struggle of the Ukrainian people against the russian invaders 52–58
- Editorial Board of "Biophysical Bulletin"**
Hope in difficult times 59



<https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-01>

7th INTERNATIONAL CONFERENCE “NANOBIOPHYSICS: FUNDAMENTAL AND APPLIED ASPECTS”

7th International conference “NANOBIOPHYSICS: Fundamental and Applied Aspects” – NBP-2021 took place on October 4-8, 2021 in Kharkiv, Ukraine, at the Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine.

“NanoBioPhysics” conference series was jointly launched in 2009 by B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine (ILTPE NASU) and the Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IP NASU). Previous conferences were organized on biennial basis in Kharkiv and Kyiv in rotation.

Pandemic situation of the recent years predetermined the hybrid offline/online format of the NBP-2021 conference: among 80 registered participants about 40 scientists have presented their lectures and posters offline (Photo 1) and up to 40 participants were joining the sessions online (Photo 2). Contributions coauthored by scientists from Ukraine, Germany, Poland, Italy, Belgium, Belarus, Bulgaria, Lithuania, Sweden, Romania, Czech Republic, United Kingdom, USA, China, France, and Denmark were presented. 16 keynote lectures and 18 oral presentations were made and 51 posters were discussed offline (Photo 3) and online. Book of abstract of the NBP-2021 contributions was published [1].



Photo 1. Offline participants of the 7th International conference “NANOBIOPHYSICS: Fundamental And Applied Aspects”, 2021, ILTPE NASU, Kharkiv, Ukraine.

In cites: Karachevtsev VA, Kosevich MV, Dovbeshko GI. 7th international conference NBP-2021 “Nanobiophysics: fundamental and applied aspects”. Biophysical Bulletin. 2022;47:7–12. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-01>

Open Access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

In order to discuss urgent problems in an emerging scientific field combining biophysics and nanotechnology, as well as its progress and prospects, the following sessions were organized:

- Nanobiohybrids formed by 1-D or 2-D nanomaterials with bioobjects,
- Biomolecules on nanoparticles and nanostructured surfaces,
- Physical aspects of biomolecular nanosystems,
- Theoretical calculations and computer modeling of nanobiosystems,
- Applied aspects of nanobiophysics.

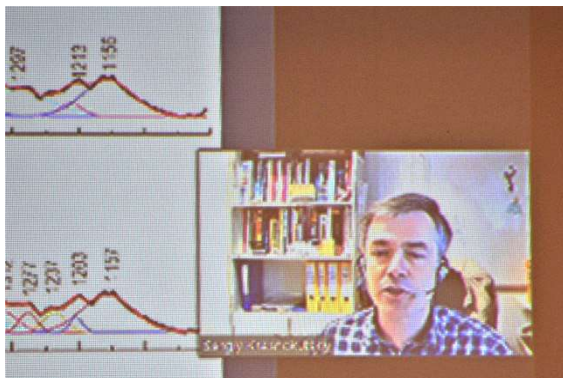


Photo 2. Online lecture delivered from Germany by Dr. S. Krasnokutski.



Photo 3. Signs of the times: poster session discussion under the quarantine conditions. Drs. O. Vashchenko, A. Ivanov, G. Dovbeshko.

Recent research advances in the field of nanobiophysics achieved by the scientists from the host ILTPE NASU (*Kharkiv, Ukraine*) organization were reported in a number of presentations. Chairman of the NBP-2021 conference, the head of the Department of molecular biophysics of the ILTPE NASU, corresponding member of the NAS of Ukraine, Professor **Karachevtsev V. A.** summarized the results of investigations of the nucleic acids interactions with nanomaterials in his plenary lecture “Single- and double-stranded polynucleotides on graphene/graphene oxide: structures and binding energies”. A variety of experimental and theoretical methods as well as their combination, successfully applied to characterization of nanobioobjects, was presented. Vice chairman of the conference, Dr. **Stepanian S. G.** highlighted a problem of quantum-mechanical insight into complexation of 2D nanomaterials with biomolecules. Dr. **Ivanov A. Yu.** talked about experimental FTIR spectral studies combined with and *ab initio* calculations of the pyrimidine nucleosides in Ar matrices and condensed films with graphene oxide at low temperatures. Dr. **Glamazda A. Yu.** reported on spectroscopic studies of porphyrin functionalized aligned SWNT:DNA nanohybrids encapsulated in stretched gelatin films. Dr. **Kurnosov N. V.** described spectroscopic and AFM characterization of the molybdenum disulfide exfoliated with nucleotides and electronic transport in composite film of carbon nanotubes with molybdenum disulfide. Dr. **Karachevtsev M. V.** discussed the disclosure of the influence of flexible surface of graphene on RNA duplex adsorption by means of molecular dynamics simulation. Dr. **Usenko E. L.** presented results of study of effect of UV irradiation on the thermal stability of native DNA in the presence of TiO₂ nanoparticles. Dr. **Plokhotnichenko A. M.** described implementation of the refined method of electrospinning preparation of nanofibers containing Ag nanoparticles or carbon nanotubes. Dr. **Pashynska V. A.** publicized the development of mass spectrometry approach to study of nanobiocomplexes which was aimed to search of mass spectrometric molecular markers of modulation effects occurring under

drugs co-administering. The point-contact spectroscopy developed at the ILTPE NASU was applied by Dr. **Kamarchuk G. V.** to elaboration of the point-contact sensors as an advanced tool for real-time analysis of molecular systems.

The achievements of biophysicists from the co-organizer of the conference, IP NASU (Kyiv, Ukraine), were introduced in the talk of the head of the Department of physics of biological systems, Professor **Dovbeshko G. I.** in her plenary lecture called “Graphene-like nanostructures as a platform for studying biological macromolecules and cells: FTIR, RAMAN, CARS, fluorescent spectroscopy and microscopy data”.

The response of biophysicists to the present challenge of COVID pandemic was reflected in the lectures by Professor **Shestopalova A. V.** (Kharkiv, Ukraine) “Blocking the binding of the SARS-CoV-2 coronavirus to the ACE2 cell receptor: results of molecular modeling” and by Professor **Zholobak N. M.** (Kyiv, Ukraine) “Physicochemical determinants of virus-cell interaction”. During the concluding session a vivid discussion of this subject took place in the framework of the Round Table “How biophysics and nanosciences meet modern challenges: the case of COVID-19”. In particular, evaluation of experimental mass spectrometric facilities for addressing the viruses and coronaviruses related problems was made in a poster presentation by Dr. **Shelkovsky V. S.** (Kharkiv, Ukraine).

Contribution of biophysics and nanoscience to solution of another urgent biomedical problem of cancer research and anticancer therapy was highlighted in the lecture delivered by Professor **Kutsevol N. V.** (Kyiv, Ukraine) “Multicomponent nanosystems for anticancer therapy: recent advances and disadvantages”. Elaboration of novel nanomaterials for a promising method of anticancer and antimicrobial photodynamic therapy was addressed in a series of presentations: “Study of zinc tetraphenylporphyrin/dextran graft polyacrylamide copolymer/Au nanoparticles nanosystem applicability for photodynamic therapy” by Professor **Yeshchenko O. A.** (Kyiv, Ukraine), “New hybrid structures based on oxygen-free graphene and aluminum phthalocyanine chloride for photodynamic therapy” by Professor **Klimenko I. V.**, “Hydrogel-silver nanoparticle composites for antibacterial photodynamic therapy” by Professor **Nadtoka O. M.** (Kyiv, Ukraine). Bionanophotonic approach to some modern health challenges was described in the lecture by Professor **Yashchuk V. M.** (Kyiv, Ukraine).

Wide range of biomedical aspects of applications of nanomaterials and related investigations at the nano level was embraced in a set of presentations. Here it is worth to stress the contribution of research teams headed by the “women in science” being recently elected as corresponding members of the National Academy of Sciences of Ukraine, namely Professor **Yefimova S. L.** (Kharkiv, Ukraine) with her scientific direction of “Biomedical applications of ROS-regulating nanomaterials”, and Professor **Trusova V. M.** (Kharkiv, Ukraine) with her scientific direction related to biophysical basis of fight against neurodegenerative diseases: “Amyloid fibrils as a scaffold for multistep energy transfer”. Dr. **Kuznetsova K. S.** (Kharkiv, Ukraine) described possibilities of dynamic control of enzymatic reactions using microwave dielectrometry method for biomedical applications. Professor **Sukhoviya M. I.** (Uzhgorod, Ukraine) presented data on biophysical mechanisms of the influence of slow electrons on biostructures.

Another set of talks was connected with the advances in development of novel nanomaterials. Professor **Sorokin A. V.** (Kharkiv, Ukraine) lectured about features of the “AMPHI-PIC J-aggregate – bovine serum albumin” complexes. Dr. **Vashchenko O. V.** (Kharkiv, Ukraine) described molecular aspects of recyclization of N-substituted 2-iminocoumarines and Dr. **Tatarets A. L.** (Kharkiv, Ukraine) introduced squaraine and norsquaraine fluorescent dyes for protein investigation. Professor **Buchatskyi L. P.** (Kyiv, Ukraine) addressed an interesting theme of application of spherical virus-like particles

for nanobiotechnology. Dr. **Kalinkevich O. V.** (*Sumy, Ukraine*) presented data on controllable structures on the surface of natural polymers made by proton beam writing and femtosecond laser treatment.

More results of theoretical calculations and computer modeling of nanobiosystems were covered in the lectures of Professor **Volkov S. N.** (*Kyiv, Ukraine*) “On possible role of hydrogen peroxide molecules in ion beam therapy of cancer cells” and Dr. **Perepelytsya S.** (*Kyiv, Ukraine*) “Mechanisms of spermidine³⁺ interactions with the DNA double helix at the nanoscale”. Dr. **Lisnyak Yu. V.** (*Kharkiv, Ukraine*) presented data on modeling of drug-target interactions of antimicrobial peptides with phospholipids of the inner membrane of gram-negative bacteria and Dr. **Dubey I. Ya.** (*Kyiv, Ukraine*) reported on quantum chemical study of binding of cyanine-based telomerase inhibitor to a parallel DNA quadruplex.

Several talks were devoted to biophysical investigations of nanoobjects related to space research problems and (bio)chemical evolution in space. Dr. **Krasnokutski S. A.** (*Jena, Germany*) described novel experiments initiated by the Astrophysics group of the Max Planck Institute for Astronomy of the Friedrich Schiller University, aimed at investigation of processes of condensation of atomic carbon as a route to proteins origin in space. A vice chairman of the conference, Dr. **Kosevich M. V.** (*Kharkiv, Ukraine*) lectured about mass spectrometric simulation of nanoclusters related to chemical evolution in space.

A special session of the Ukrainian Biophysical Society (UBFT) was organized in the framework of the conference. About 40 UBFT members joined online broadcast of the offline session. The participants of the event were greeted by the president of the UBFT, head of Department of Biophysics and Medical Informatics of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Professor **Zholos A. V.** Current problems and future activities of the UBFT were lively discussed by the participants. In the scientific part of the session the head of the Kharkiv branch of the UBFT, head of Department of molecular and medical biophysics of the V. N. Karazin Kharkiv National University, Professor **Berest V. P.** gave a lecture on the subject of adsorption of Gramicidin S on nano-sized liposomes, which can mitigate severe side effects of the antimicrobial peptide. Professor **Soloviev A. I.** (*Kyiv, Ukraine*) lectured on nontraditional nano-openers of large-conductance Ca-activated K channels. Young scientist Dr. **Dryn D. O.** (*Kyiv, Ukraine*) gave a talk on nanostructured carbon materials as novel modulators of diverse types of ion channels.

A special attention was paid to the promotion of young scientists and professional orientation of students. A team of the Young Scientist Council of the ILTPE NASU involving Drs. **Mysko-Krutik N., Herus A., Kravchuk O., Shchuka M.** together with SPIE (The International Society of Optics and Photonics) and OSA (The Optical Society) branches in Kharkov have organized SPIE & OSA Workshop “Career development opportunities for scientist and students” in the framework of the conference. Young scientists of the Kharkov academic institutes as well as students of Kharkov institutes and universities took active part in this event.

Traditional competition for the best presentation awards resulted in nomination of three presentations: “Mechanism of reactive oxygen species scavenging by GdYVO₄:Eu³⁺ nanoparticles” by Dr. **Hubenko K. O.** (*Kharkiv, Ukraine*); “The determination of melatonin content in the human body using exhaled gas analysis” by Dr. **Harbuz D. O.** (*Kharkiv, Ukraine*); “Molybdenum disulfide exfoliated with nucleotides: spectroscopy and AFM characterization” by Dr. **Kurnosov N. V.** described spectroscopic and AFM characterization of the molybdenum disulfide exfoliated with nucleotides”.

The next conference of the series is expected to be organized in autumn 2023 in Kyiv.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare that there is no conflict of interest.

REFERENCES

1. 7th International Conference “Nanobiophysics: fundamental and applied aspects” (4-8 October 2021, Kharkiv): Book of abstracts / Editor V. A. Karachevtsev. – Kharkiv: FOP Brovin O. V.– 2021. - 126 p.


V. A. Karachevtsev¹, M. V. Kosevich^{1,2}, G. I. Dovbeshko³

¹ B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, 47 Nauky Avenue, Kharkiv, 61103, Ukraine

² V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

³ Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 46 avenue Nauki, Kyiv, 03028, Ukraine

V. A. Karachevtsev  <https://orcid.org/0000-0003-4580-6465>

M. V. Kosevich  <https://orcid.org/0000-0003-0257-4588>

G. I. Dovbeshko  <https://orcid.org/0000-0002-7701-0106>

7th INTERNATIONAL CONFERENCE

“NANOBIOPHYSICS: FUNDAMENTAL AND APPLIED ASPECTS”

V. A. Karachevtsev¹, M. V. Kosevich^{1,2}, G. I. Dovbeshko³

¹ B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, 47 Nauky Avenue, Kharkiv, 61103, Ukraine

² V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

e-mail: mvkosevich@gmail.com

³ Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 46 avenue Nauki, Kyiv, 03028, Ukraine

7th International conference “NANOBIOPHYSICS: Fundamental and Applied Aspects” (NBP-2021) took place on October 4-8, 2021 at B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv, Ukraine). Previous six conferences, starting from 2009, were organized due to joint efforts of B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the NAS of Ukraine and Institute of Physics of the NAS of Ukraine on biennial basis in Kharkiv and Kyiv alternatively. Among 80 registered participants from 16 countries about 40 scientists have presented their lectures and posters offline and other participants were joining the sessions online. 16 keynote lectures and 18 oral presentations were made and 51 posters were discussed offline and online. The goal of the conference was achieved: urgent problems, advances and perspectives of the topical scientific direction of nanobiophysics which embraces achievements of modern molecular biophysics and nanotechnology were discussed. The subjects of physical aspects of biomolecular nanosystems, properties of biomolecules on nanoparticles and nanostructured surfaces, nanobiohybrids formation by 1-D or 2-D nanomaterials with bioobjects, theoretical calculations and computer modeling of nanobiosystems, and applied aspects of nanobiophysics were highlighted at the related sessions. Several additional accompanying events were organized in the framework of the conference, including a Round Table “How biophysics and nanosciences meet modern challenges: the case of COVID-19”, a special session of the Ukrainian Biophysical Society, and SPIE (The International Society of Optics and Photonics) and OSA (The Optical Society) Workshop “Career development opportunities for young scientist and students”. Book of abstract based on NBP-2021 materials was published.

KEY WORDS: nanobiophysics; biomolecular nanosystems; bionanomaterials; bionanocomposites; nanostructured surfaces; intermolecular interactions; computer simulation.

7 МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

«НАНОБІОФІЗИКА: ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ТА ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ»

В. О. Карачевцев¹, М. В. Косевич^{1,2}, Г. І. Довбешко³

¹ Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, пр. Науки, 47, Харків, Україна, 61103

² Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, Україна, 61022

e-mail: mvkosevich@gmail.com

³ Інститут фізики Національної академії наук України, пр. Науки, 46, Київ, Україна, 03028

Сьома міжнародна конференція «НАНОБІОФІЗИКА: фундаментальні та прикладні аспекти» (NBP-2021) відбулася 4-8 жовтня 2021 р. у Фізико-технічному інституті низьких температур

ім. Б. І. Веркіна НАН України (Харків, Україна). Попередні шість конференцій починаючи з 2009 року проводилися на дворічній основі спільними зусиллями Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України та Інституту фізики НАН України по черзі у Харкові та Києві. Серед 80 зареєстрованих учасників з 16 країн біля 40 вчених зробили лекції та постерні презентації наживо та решта приєдналася до сесій онлайн. Було зроблено 16 пленарних і 18 усних презентацій та 51 постер було обговорено офлайн та онлайн. Мету конференції було досягнуто: обговорено нагальні проблеми, успіхи та перспективи розвитку сучасного наукового напрямку – нанобіофізики, яка охоплює досягнення молекулярної біофізики та нанотехнології. На відповідних сесіях було висвітлено питання фізичних аспектів біомолекулярних наносистем, властивостей біомолекул на наночастинках та наноструктурованих поверхонь, створення наногібридів біологічних об'єктів з 1-D та 2-D наноматеріалами, теорії та комп'ютерного моделювання нанобіосистем і практичних аспектів нанобіофізики. У рамках конференції було організовано кілька додаткових супутніх заходів: круглий стіл «Як біофізика та нано-науки відповідають на сучасні виклики: випадок COVID-19», спеціальна сесія Українського біофізичного товариства, SPIE & OSA майстерклас «Розвиток кар'єрних можливостей для молодих учених та студентів». Матеріали конференції NBP-2021 видано у збірці тез.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: нанобіофізика; біомолекулярні наносистеми; біонаноматеріали; біонанокompозити; наноструктуровані поверхні; міжмолекулярні взаємодії; комп'ютерне моделювання.

ДІЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-02>

УДК 597.551.2-131+57.044(546.71)

ВПЛИВ ФТОРИДУ НАТРІЮ НА РОЗВИТОК ТА ВИЖИВАННЯ
ЗАРОДКІВ В'ЮНАІ. Р. Грицай, С. М. Мандзинець^{id}, М. В. Бура^{id}

Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Грушевського, 4, м. Львів, Україна, 79005

e-mail: mcelevyich@yahoo.com

Надійшла до редакції 16 липня 2021 р. Переглянута 9 лютого 2022 р.

Прийнята до друку 17 лютого 2022 р.

Актуальність. Дослідження впливу фториду на клітинному рівні, як одного з поширених забруднювачів довколишнього середовища, все ще має суттєве значення для біофізики, медицини та екології, оскільки його вплив на ембріональні об'єкти є маловивченим.

Метою роботи було: 1) дослідження впливу фториду натрію (в мінімальній концентрації для пригнічення росту) на морфологічний розвиток зародків в'юна; 2) з'ясування ступеня виживання зародків за присутності в середовищі інкубації фториду натрію та визначення коефіцієнта виживання K_v .

Матеріали і методи. Овуляцію у самок в'юна (*Misgurnus fossilis* L.) стимулювали внутрішньом'язовим введенням самкам хоріогонічного гонадотропіну (500 од.), ікру одержували через 36 год після стимуляції, запліднювали в чашках Петрі суспензією спермій за Нейфахом А. А. Стадії розвитку контролювали візуально під біокулярним мікроскопом МБС-9 з фотографічною приставкою; експериментальні зародки інкубували у розчині Гольцфретера з додаванням фториду натрію до кінцевої мінімальної концентрації 500 мкмоль/л.

Результати. Фторид натрію гальмував розвиток зародків в'юна та призводив до формування дефектів розвитку. Найбільш помітними вадами розвитку, спричиненими фторидом натрію, є зменшення розмірів голови та хвоста личинок, погана пігментація тіла, зміни діаметру очей та рефлексу дотику зародків. У результаті накопичення фториду в клітинах зародків на третю добу розвитку смертність зародків зросла до 88,9%. Загальна кількість личинок, що вижили впродовж 12 діб за дії фториду натрію, становить близько 2%.

Висновки. На досліджуваній моделі зародків в'юна підтверджено пряму тератогенну дію NaF, яку спостерігали інші дослідники на моделі FETAX. Виникнення дефектів розвитку ембріонів холоднокровних, зумовлених NaF, не виключає можливість прояви тератогенних ефектів у теплокровних тварин, зокрема у людини. Уникнення надмірного потрапляння фтору в організм через обмеження споживання їжі або напоїв з високим вмістом фтору, використання фтору в засобах по догляду за зубами та інше, може потребувати окремої деталізованої оцінки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: фторид натрію; морфологія; виживання; зародки; в'юн; вади розвитку.

У навколишньому середовищі виявлено лише фторвмісні сполуки (у вільному стані фтор (F) у природі не існує), оскільки фтор має здатність утворювати неорганічні та органічні комплексні сполуки — фториди (вміст цих комплексів в Земній корі становить приблизно 0,06–0,09%) [1, 2]. Фтор як хімічний елемент не піддається

Як цитувати: Грицай ІР, Мандзинець СМ, Бура МВ. Вплив фториду натрію на розвиток та виживання зародків в'юна. Біофізичний вісник. 2022;47:13–26. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-02>

In cites: Grytsaj IR, Mandzynets SM, Bura MV. Influence of the sodium fluoride on the development and survival of the loach embryos. Biophysical Bulletin. 2022;47:13–26. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-02> (in Ukrainian)

Open Access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

метаболічним перетворенням, однак може або накопичуватися, або лише виводитися з організму. Експерименти з радіоактивним фтором показали, що його внутрішньоклітинна концентрація залежить від градієнту рН цитоплазми клітини та завжди на 10–50% нижче, ніж концентрація у плазмі крові [1]. Фтор визнаний широко розповсюдженим природним забруднювачем, який має сильну токсичну дію на м'які тканини, включаючи, мозок, нирки, яєчка та їх придатки. Максимальне накопичення фтору при тривалому надходженні в організм людини виявлено в нирках [3], через які виводиться в середньому до 50% спожитого фтору. Не виведений фтор з організму у людини розподіляється між органами, зокрема, накопичується в кістках [4], дентині зубів, епіфізі та інших тканинах [3]. Токсичні дози фтору для людини варіюють в широких межах: для дорослих становлять 16–64 мг/кг, а для дітей — 3–16 мг/кг [1, 2].

Проте відомо, що низькі концентрації фтору необхідні для нормального росту і розвитку організму людини. Фтор регулює не тільки ріст і розвиток кісткової тканини (остеобласти і остеокласти), але й контролює метаболізм клітин ендотелію, печінки, нирок, міокарда і нервової системи [1, 5–6]. З плазми крові фтор швидко розподіляється шляхом пасивної дифузії у внутрішньоклітинні і позаклітинні рідини та тканини, проте певні організми сформували в процесі еволюції системи захисту — CLC^F -родина антипортерів F^-/H^+ та $Fluc/FEH$ родина F-каналів [7]. Подальші дослідження бактеріального $stcB$ (пізніше перейменованій на $Fluc$) встановили, що ці протеїни є іонними каналами з високою селективністю (> 10000 разів) щодо фтору, ніж для хлору [7]. Експортери фторидів ідентифіковано виключно у представників одноклітинних організмів (*S. cerevisiae* та *N. crassa*), однак гомологи FEH родини F-каналів виявлено і в представників царства Рослин (кукурудза, рис, виноград, апельсини та огірки); а в представників царства Тварин (три види морських організмів, включаючи, морську губку *Amphimedon queenslandica*) ідентифіковано ORF-протеїни подібні до FEH [8].

Токсичність фтору пов'язана з його високою біологічною активністю на молекулярному та клітинному рівні: інтенсифікація перекисного окиснення ліпідів, пошкодження молекул ДНК, індукція апоптозу та зміни клітинного циклу [9–10]. Jeng J. H. та співавтори [11], досліджуючи вплив фториду натрію (NaF) на фібробласти слизової оболонки ротової порожнини людини, встановили, що *in vitro* NaF проявляє токсичність шляхом інгібування синтезу протеїнів, дисфункцією мітохондрій [11] та виснаженням запасів внутрішньоклітинного АТФ [12].

Дослідження впливу фторидів на дорослий організм обумовлені фторуванням питної води, знищенням комах, грибків, гризунів у побуті, видаленням фтористого водню з відпрацьованих газів у промисловості — це індукує виникнення проблем фізичного та репродуктивного здоров'я, як у людей, так і у тварин [13–14]. Зокрема, токсичність фтору викликає серйозне занепокоєння у осіб, які споживають водні організми (прісноводних риб та безхребетних) як харчовий об'єкт [15]. Прісноводні представники родини корошових (*Cyprinus carpio* [16] та *Carassius auratus gibelin*) та хижі риби (північна щука (*Esox lucius*) та окунь європейський (*Perca fluviatilis*)) накопичують фтор найбільше у зябрах, менше у печінці, мозку, нирках, кишківнику та м'язовій тканині залежно від тривалості дії чинника та виду [17].

Багаточисельні дослідженнями підтвердили вплив фтору на ріст та розвиток молодих особин риб: виявлено помітне зниження росту у молодих особин осетрових риб родини *Acipenseridae* впродовж 90 днів (10, 25 і 60 мг F⁻/л) [18], зміну довжини та ваги тропічних представників родини корошових *Puntius ticto* [19] й *Cyprinus carpio* [20], а також прісноводних риб *Heteropneustes fossilis* (Bloch) ряду Сомоподібних [21]. Зниження росту, ваги та розмірів молодих особин риб корелює з концентраціями фтору у воді.

Як і у ссавців, так і у прісноводних організмів, фтор діє як потужний інгібітор метаболізму, зокрема, ініціюючи гістопатологічні незворотні зміни у печінці сома *Heteropneustes fossilis* (зміни активності ензимів та зниження вмісту загального білка) [22], у м'язах, зябрах і нирках *Labeo rohita* (зниження загального вмісту білків, глікогену та ліпідів) [17, 23]. Tripathi N. із співробітниками, встановили, що високі концентрації фтору (35 і 70 мг F⁻/л) призводять до вираженого цитоксичного та генотоксичного ефекту у прісноводного сома *Clarias batrachus* [24], а також фтор здатен ініціювати окислювальний стрес у печінці риб *Channa punctatus* [25].

Однак, дослідження впливу фториду чи фторвмісних сполук на ембріони та личинки водних організмів, зокрема риб, та їх розвиток є малочисельними та недостатніми. Fu M. та співавтори [26] продемонстрували, що NaF у низькій та високій дозах (0,2 та 120 мг/л відповідно) епігенетично порушує дозрівання ооцитів мишей та розвиток ембріонів, активуючи апоптоз ембріонів на стадії бластоцисти не залежно від концентрації тератогена. Інтенсивний аналіз літератури показав, що фтор негативно впливає на функції сперми, включаючи морфологію, рухливість, емність та реакцію акросом сперматозоїдів щурів та мишей [27–29], які є ключовим тригером запліднення як *in vitro*, так і *in vivo* [30].

Одним із способів оцінити вплив фториду натрію на ембріональний розвиток є вивчення його впливу на розвиток ембріонів в'юна (*Misgurnus fossilis* L.), які як і FETAX (Frog Embryo Teratogenesis Assay — *Xenopus* (FETAX)), можна використовувати як скринінговий тест для ідентифікації хімічних тератогенів [31, 32]. Неодноразово попередніми дослідженнями підтверджено, що зародки в'юна є адекватною тест-системою для дослідження впливу хімічних [33, 34] та фізичних [35] чинників на живі організми у нашій кліматичній зоні, і, завдяки короткому періоду ембріогенезу, є зручним об'єктом для експериментальних досліджень. Риби реагують на токсичні речовини подібно до вищих хребетних, наприклад, ссавців, тому вони можуть бути використані для виявлення речовин, які викликають токсичний ефект у людини [36], в даному випадку для вивчення ембріотоксичної дії фториду натрію. Враховуючи екологічний стан навколишнього середовища та малочисельні дані щодо впливу фторидів на ембріональний розвиток, **метою роботи** було дослідити вплив фториду натрію на морфологічний розвиток зародків холонокровних у період раннього ембріогенезу в'юна.

МАТЕРІАЛИ Й МЕТОДИ

Дослідження проведені на зародках в'юна (*Misgurnus fossilis* L.) у період від запліднення до стадії 10 поділу (2, 16, 64 бластомерів, 8 (256 бластомери) та 10 поділи бластомерів (1024 бластомери)). Овуляцію стимулювали внутрішньо-м'язовим введенням самкам хоріогонічного гонадотропіну (500 од). Ікру одержували через 36 год після стимуляції та запліднювали в чашках Петрі суспензією спермій за Нейфахом А. А. [33, 37]. Сім'яники отримували після декапітації та розтину черевної порожнини самців. Через 5–10 хв після запліднення зиготи відмивали та інкубували у фізіологічному розчині Гольтфретера [33] при температурі 20–22°C. В експерименті використано 3 самки і 3 самці в'юна (з партії заплідненої ікри відбирали по 100 ікринок в кожную чашку Петрі (для повтору в серії досліду на пару особин ставили 3 чашки (загалом 900 запліднених яйцеклітин)). Під час виконання експериментальних робіт були дотримані міжнародні норми гуманного поводження з лабораторними тваринами та вимоги статті 26 Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження».

Контрольні зародки та личинки в'юна інкубували у фізіологічному розчині Гольтфретера наступного складу (ммоль/л): CaCl₂ — 1,8, NaCl — 110, KCl — 1,4, Три-

НС1 — 5. Інкубаційне середовище, як у контролі, так і в експерименті, змінювали щоденно. В умовах досліду зародки інкубували у розчині Гольтфретера з додаванням фториду натрію до кінцевої концентрації 500 мкмоль/л (для організації тестування ембріотоксичного впливу NaF використовували методичні рекомендації OECD [38]), оскільки Goh E. H. та Neff A.W. (2003) [39] встановили мінімальну концентрацію NaF для пригнічення росту (MCIG) ембріонів жаб FETAX, яка складає від 0 до 200 ppm (відповідає 500 мкмоль/л).

Спостереження за зародками й личинками, як контрольної, так і експериментальної груп, здійснювали впродовж 12 діб за допомогою біокулярного мікроскопа МБС-9 з фотографічною приставкою в режимі реального часу. Морфологічний розвиток контрольної та експериментальної груп ембріонів оцінювали за таблицями розвитку Белоусова Л. В. [40], а морфологічні деформації вимірювали за допомогою програми *Photoshop (CS 2014v15)*. Рефлекс дотику оцінювали візуально, використовуючи кінчик мікропіпетки.

У дослідженнях використовували реактиви вітчизняного виробництва кваліфікації х.ч., а також Tris («Sigma», США). Статистичний аналіз даних (вірогідність різниці визначених показників та нормальність розподілу) проводили за допомогою *t-теста* Стьюдента за допомогою програми *SPSS Statistics Base* (<https://www.ibm.com/products/spss-statistics>), а оцінку кривих виживання здійснювали розраховуючи логранговий критерій [41].

РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

На сьогодні питання про біогенний вплив фтору на клітинному рівні є відкритим та актуальним, оскільки необхідна його фізіологічна кількість знаходиться в діапазоні концентрації, що викликає також й токсичну дію [42].

Ефекти фторидів на фізіологічні функції організму і клітинний метаболізм залежать від типу клітин, концентрації та тривалості дії [1, 43]. Так, наприклад, у кістковій тканині та дентині людини фтор в мікромолярних концентраціях викликає проліферацію та ріст клітин [5, 12], тоді як в мілімолярних — пригнічує проліферацію та індукує апоптоз клітин миші лінії MC3T3-E1 [44]. Молекулярні механізми, що лежать в основі токсичності фтору, відрізняються за своєю природою. Фтор здатен стимулювати мембранні G-білки шляхом активації каналів передачі сигналу низхідного потоку, таких як PKA-, PKC-, PI₃-кіназа, Ca²⁺- і MAPK-залежні системи. Поряд з іншими токсичними ефектами встановлено, що фторид викликає окислювальний стрес у ссавців [1, 26], що призводить до надмірного вироблення вільних радикалів, інтенсифікації ПОЛ, зниження співвідношення GSH/GSSH та зміни в функціонуванні антиоксидантних ензимів, а також інгібує гліколіз, викликаючи виснаження клітинного АТФ та порушення метаболізму [29].

Для підтвердження ембріотоксичних властивостей фториду натрію на клітинному рівні та рівні всього організму провели серію досліджень впливу NaF (500 мкмоль/л) на морфологію ембріонів прісноводної риби в'юна *Misgurnus fossilis* L.

У результаті проведеної першої серії досліджень встановлено, що у зародків, які розвивалися в контрольному розчині Гольтфретера для холоднокровних перший поділ проходив через 60±2 хв (M±m, [33, 40]), а кожен наступний — через 30±2 хв.

Після запліднення у нормі спостерігали відділення жовткової оболонки від поверхні ядра і утворення перивітелінового простору, оцінивши стадії розвитку за таблицями Белоусова Л. В. [40]. Паралельно відбувалося формування цитоплазматичного горбика. Після першої години інкубації спостерігали поділ зиготи на 2 бластомери (рис. 1, а), через 1,5 год після запліднення — 4 бластомери.

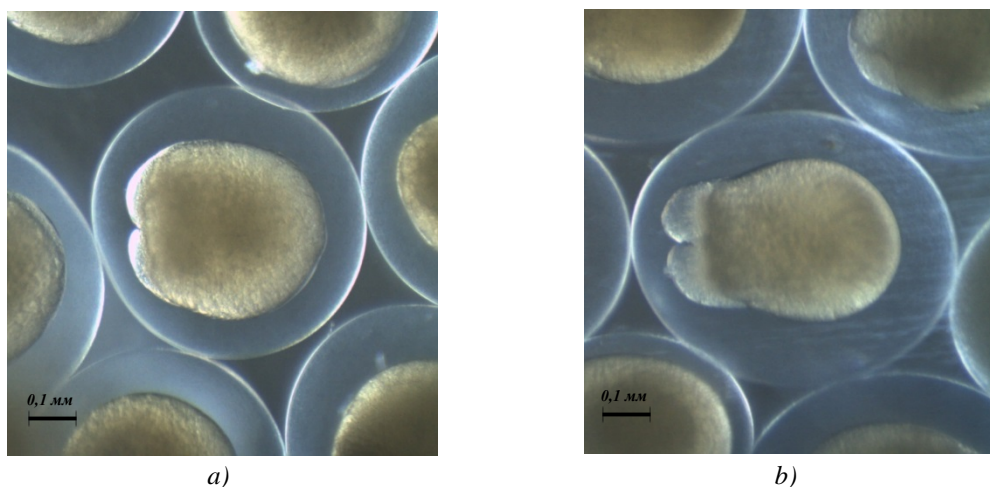


Рис. 1. Розвиток зародків в'юна на стадії першого поділу в контролі (a) та за впливу 500 мкмоль/л NaF (b). Фотографія $\times 7$.

Fig. 1. Development of the loach embryos at the stage of the first division in the control (a) and treated with 500 $\mu\text{mol/L}$ NaF (b). Photograph $\times 7$.

Зародки, які розвивалися в середовищі за присутності фториду не відставали за стадіями розвитку, однак спостерігали набряк бластомерів (до 41% зародків) та деформування клітин (рис. 1, b). Ймовірно, набряк зародкових клітин зумовлений дифузійною аніонів фтору у цитоплазму клітин, оскільки аніони переважно потрапляють у внутрішньоклітинне середовище шляхом дифузії за градієнтом концентрації. Однак водні організми, зокрема, риби та безхребетні [45], можуть зазнати більш негативного впливу забруднення фтором, ніж ті, що живуть у твердих або морських водах, оскільки біодоступність іонів фтору зменшується із збільшенням твердості води.

Згідно з таблицями розвитку Белоусова Л. В. [40] на 3 поділі формуються вісім бластомерів, а на 4 поділі — 16 бластомерів. Через 3 год після запліднення зародки представлені 32 бластомерами, але борозни 5-го поділу проходять паралельно екватору жовтка, в результаті чого утворюється «шапочка» на анімальному полюсі, або бластодиск, клітини якого не відділені від жовтка плазмалею [40]. У зародків, які розвивалися за присутності в середовищі фториду натрію (500 мкмоль/л), упродовж трьох годин після запліднення не виявлено дефектів розвитку порівняно з контрольними зразками, однак незначна частина (16,7%, 151 особини) зародків загинула впродовж першої доби розвитку.

Goh E. H. та Neff A.W. встановили, що найбільша частка морфологічних дефектів проявляється за додавання фториду натрію у середовище інкубації виключно впродовж 9 години після запліднення [39]. Однак зародки стають нечутливими до дії фториду, якщо додавати його в середовище після 15 години розвитку зародків. Також період дії експозиції відіграє важливу роль у виникненні аномалій розвитку та загибелі організму та тяжкості токсичної дії фториду натрію [46]. Тобто зародки в перші години розвитку є найчутливішими до впливу екзогенних чинників щодо появи дефектів, оскільки саме в цей період зародкам необхідні мікроелементи, які вони засвоюють виключно з навколишнього середовища.

На 36 стадії розвитку (48 год) у хвостовій мезодермі зародків розвивається 10 сомітів (рис. 2, a), проходить пігментація очей, однак тіло на цей час ще не

пигментоване. Зародки, всередині оболонок, починають енергійно рухатися. У контролі на початку третьої доби (через 49–51 год після запліднення) (рис. 2, *a*) відбувається вилуплення личинок, які рухливі і активно плавають в середовищі, формується хвостовий відділ і очні ямки, збільшується головний відділ черепа.

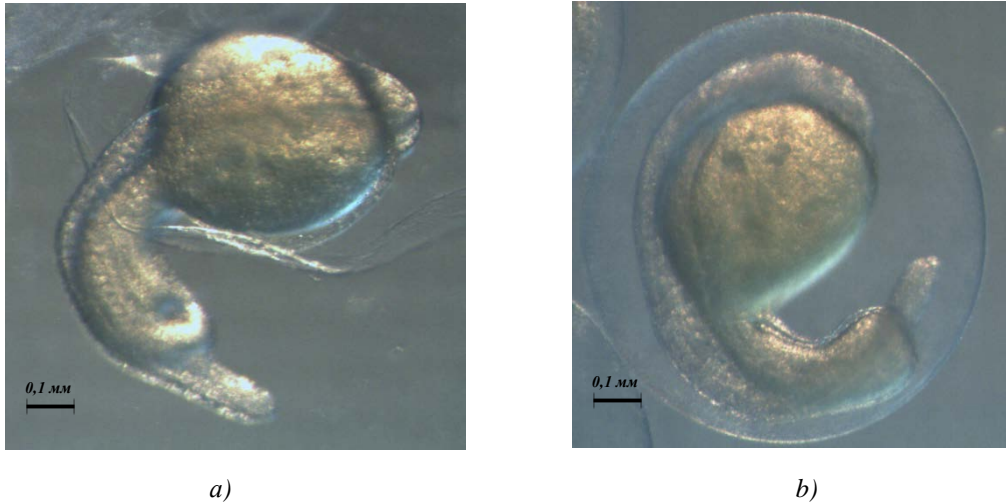


Рис. 2. Розвиток зародків в'юна на 2 добу у контролі (*a* [47]) та за впливу 500 мкмоль/л NaF (*b*). Фотографія $\times 7$.

Fig. 2. Development of the loach embryos on the second day in the control (*a* [47]) and treated with 500 $\mu\text{mol/L}$ NaF (*b*). Photograph $\times 7$.

До 35 % експериментальних зародків (315 особин), які розвивалися в присутності 500 мкмоль/л фториду, не вилупилися з перивітелінової оболонки (рис. 2, *b*), але проявляли значну рухову активність всередині самої оболонки.

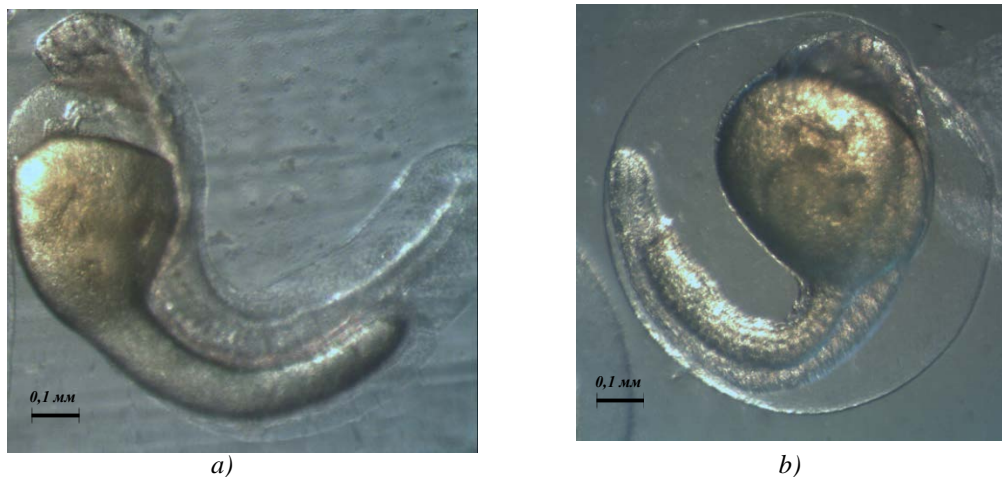


Рис. 3. Розвиток зародків в'юна на третю добу у контролі (*a*) та за впливу 500 мкмоль/л NaF (*b*). Фотографія $\times 7$.

Fig. 3. Development of the loach embryos on the third day in the control (*a*) and treated with 500 $\mu\text{mol/L}$ NaF (*b*). Photograph $\times 7$.

На третю добу розвитку усі контрольні зародки звільнилися від оболонок та активно рухалися (рис. 3, *a, b*). Зародки, які розвивалися за присутності 500 мкмоль/л NaF, не позбулися перивітелінової оболонки.

Виявлено відставання в розвитку (рис. 3, *b*), що підтверджено описаними стадіями розвитку в таблицях Белоусова Л. В. [40]. Саме на третю добу розвитку 90% із зародків, які інкубували з фторидом натрію, гинули. Це пов'язане з тим, на думку багатьох дослідників [46, 49–50], що основна біологічна функція фтору полягає в його участі у процесах росту, розвитку і мінералізації зубної та кісткової тканини в процесах осифікації (побудови) скелета. Як відомо, сполуки фтору в дорослому організмі розподіляються таким чином: кісткова тканина > емаль зубів > дентин > паренхіматозні органи. Тому розвиток аномалій у зародків й пуголовків жаб в дослідженнях [39] та появу аномалій скелета й загибель (власне на третю добу, через неможливість виходу з перивітелінової оболонки) зародків в'юна в наших дослідженнях пов'язані зі здатністю аніонів фтору акумулюватися в кістковій тканині (остеобластах) [49–50], що підтверджується токсичним впливом на хребет прісноводної риби *Channa punctatus* [51].



Рис. 4. Розвиток личинок на шосту добу у контролі (*a*) та за впливу 500 мкмоль/л NaF (*b*). Фотографія $\times 4$.

Fig. 4. Development of the loach embryos on the sixth day in the control (*a*) and treated with 500 $\mu\text{mol/L}$ NaF (*b*). Photograph $\times 4$.

Потрапляючи в організм тварин і людини, фтор взаємодіє з іонами металів (залізо, марганець, нікель тощо), утворюючи комплексні сполуки [1, 5]. Іони фтору можуть інгібувати ензими, які під час каталітичного циклу утворюють проміжні продукти (гідроксил або реакційноздатний фосфат), що веде до гальмування більшості проліферативних процесів [52] і відставання у розвитку (підтверджено нашими експериментами). Це призводить до гальмування найважливіших біологічних процесів, включаючи гліколіз, фосфорилування, синтез нуклеотидів та протеїнів, полімеризації біомолекул [1, 52], наслідком чого є поява дефектів розвитку та загибель організму.

На 4 добу розвитку спостерігали нормальний розвиток контрольних зародків [40]. А за впливу фториду натрію виявлено зниження рухової активності, що проявлялося у збільшенні залишків жовтка та набряку головного відділу (рис. 4, *b*).

Личинки на 6 добу розвитку у контролі мали видовжену форму тіла, розвинуті очні бокали та виражену пігментацію тіла (рис. 4, *a*). Личинки, що розвивалися за присутності фториду натрію, не досягали рівня розвитку, характерного для контрольних личинок (рис. 4, *b*) [40].

Личинки в'юна на 8–11 добу розвитку були рухливими та з хорошою координацією тіла, мали чітку серцеву діяльність (рис. 5, *a*).

У личинок на 9 добу експерименту, що розвивалися за присутності фториду натрію, виявили відставання у розвитку (рис. 5, *b*). Найбільш помітними вадами розвитку, спричиненими фторидом натрію, є достовірне зменшення розмірів голови,

хвоста та діаметра очей, погана пігментація тіла, сповільнення серцебиття та затримання рефлексу дотику зародків. Наприклад, при опрацюванні оцифрованих фотографій виміряно розмір голови та хвоста контрольних личинок, які становили $1,35 \pm 0,03$ та $1,48 \pm 0,04$ мм, відповідно. Тоді як внесення в середовище інкубації 500 мкмоль/л фториду натрію призводило до достовірного зниження параметрів тіла досліджуваних личинок: розмір голови — $0,98 \pm 0,03$ мм й хвоста — $0,89 \pm 0,04$ мм, відповідно ($n=15$, *** — $P < 0,001$).

Аналогічні дефекти розвитку ідентифіковані у пуголовків FETAX, що виникають за низької концентрації фториду, і частота їх зростає із збільшенням концентрації фториду натрію у середовищі інкубації [39].

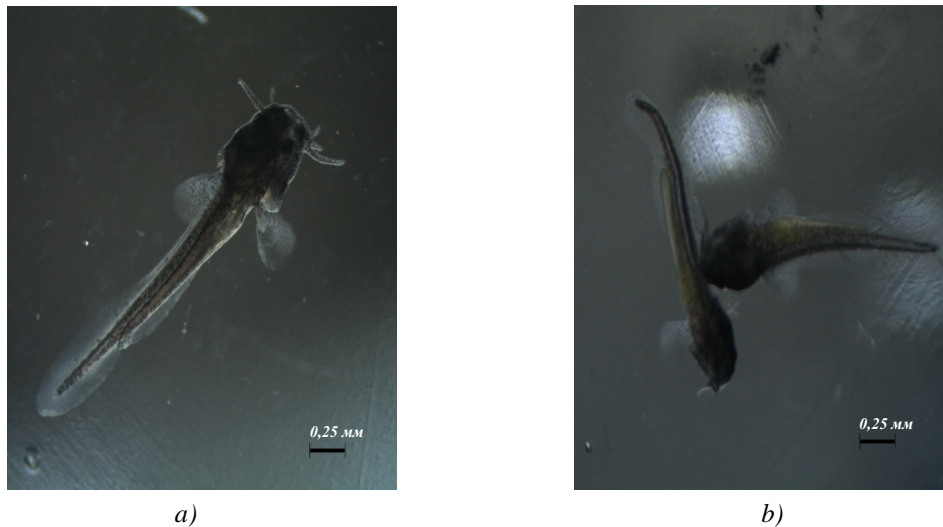


Рис. 5. Розвиток личинок в'юна на одинадцятую добу у контролі (а) за впливу 500 мкмоль/л NaF (b). Фотографія $\times 4$.

Fig. 5. Development of the loach embryos on the eleventh day in the control (a) and treated with 500 $\mu\text{mol/L}$ NaF (b). Photograph $\times 4$.

Пігментація та зменшення діаметра очей пов'язані з дефектами розвитку нервової системи [53], тоді як втрата сенсорного рефлексу може бути спричинена недостатньою рухливістю та змінами в координації личинок. На 11–12 доби розвитку у всіх личинок в'юна (1,1%), які вижили, проявлялися порушення функції нервово-м'язової системи (неспроможність до прямолінійного руху) та аномальні рухи (обертання навколо власного тіла). Відомо також про розвиток вад нервової та м'язової систем у самок щурів лінії Sprague-Dawley під час пізньої вагітності, під час відлучення молодих особин або у дорослих 3-місячних особин [54], появу негативних змін сомато-моторних рефлексів у нащадків щурів лінії Wistar [55] та у дорослих особин самців щурів Long-Evans [56], які отримували фтор у питній воді. Takahashi К. довів, що аніон фториду є не лише однією з причин розвитку вад та порушень функціонування нервово-м'язової системи у дітей із синдромом Дауна [57], а при щоденному вживанні фторидів з питною водою чи їжею є внутрішнім чинником активації процесів старіння у жінок літнього віку.

Прямим доказом впливу фториду натрію безпосередньо на нервову систему є інгібування Na^+ , K^+ -АТФази головного мозку теляти [58], а також плазматичних мембран зародків в'юна (власні дані не представлено) упродовж раннього ембріогенезу. Як відомо ензиматична активність Na^+ , K^+ -АТФази відіграє життєво важливу роль у нормальному розвитку зародків та роботі мозку [59], а інгібування

ензиматичної активності АТФази веде до появи нервово-розвивальних, нервово-психічних та нейродегенеративних розладів, а також до підвищеного ризику розвитку онкологічних, метаболічних, легеневих та серцево-судинних захворювань. Кравцовим О. В. та дослідниками [58] встановлено, що АТФ-гідролізна активність ензиму є більш стійкою щодо інгібування фторидом натрію, ніж його активність K^+ -pNPPase. Інактивація Na^+ , K^+ -АТФази фторидом натрію прямо залежить від впливу фізіологічних лігандів та модифікаторів, а також від цілісності мембранної структури. Таким чином, інактивація Na^+ , K^+ -АТФази веде до виснаження рівня АТФ [58] і порушення мембранного потенціалу клітини, що спричиняє загибель цих клітин.

Спостереження дослідників [39] разом із представленими даними свідчать про те, що NaF є тератогеном і може спричиняти дефіцити розвитку нервово-м'язової системи як у холоднокровних, так і у теплокровних тварин. Отже, щоб уникнути надмірного потрапляння фтору до живих організмів через їжу, напої, засоби догляду за зубами, а також з оточуючого середовища, необхідні деталізовані оцінки.

Отримані результати дозволяють припустити, що фтор може спричиняти вади розвитку, безпосередньо проникаючи в ембріональні тканини та взаємодіючи з їхніми структурними елементами.

Цей висновок базується на спостереженнях, що: 1) зародки, які розвивалися в середовищі за присутності фториду натрію, мали вади розвитку у порівнянні з контрольними; 2) зародки, оброблені фторидом натрію, були більш деформованими, ніж ті, що отримували хлорид натрію, і 3) наслідки впливу фториду натрію у зародків та личинок в'юна відповідали критеріям, характерним для тератогену, як і у FETAX.

Оскільки FETAX має достовірний відсоток (92%) прогнозу тератогенного впливу хімічних речовин у теплокровних тварин, зокрема, у ссавців [30], як і досліджуваний модельний зародковий об'єкт [33, 34], то існує велика ймовірність прямої тератогенної дії фториду натрію у ссавців, включаючи людей.

Відомо, що плацента у ссавців не є достатнім бар'єром для транспорту фторид іонів і транспорт фтору через плаценту змінюється залежно від стадій розвитку плода. Позитивна кореляція між рівнем фтору в сечі, навколоплідних водах, а також вмістом фтору в стегновій кістці плода і патологічними змінами стегнової кістки визначена Shi J. та співавторами [42].

Вчені стверджують, що фтор легко проникає крізь плаценту і безпосередньо впливає на розвиток ембріонів людини. Однак тератогенний ефект фториду підтверджено виключно при пероральній дозі 40 мг/кг/добу підвищеною частотою появою скелетних та вісцеральних аномалій [60]. Ці спостереження вказують на концентраційну залежність тератогенної дії NaF у ссавців. При тривалому надходженні в організм сполуки фтору здійснюють токсичний вплив на серцево-судинну і центральну нервову систему, а також на роботу печінки, нирок, щитовидної залози.

Значний вплив на приріст популяції тварин мають процеси смертності [61]. Смертність у популяції можна оцінити за інтегральним показником, що виражають як кількість особин, які загинули, відносно загальної кількості особин, народжених/отриманих впродовж певного періоду (наприклад, року чи сезону). Коефіцієнт виживання розраховують як кількість особин, які пережили певний момент часу, відносно загальної кількості особин (K_v , %).

Друга серія експериментів з вивчення впливу фториду натрію на розвиток зародків в'юна включала дослідження на виживання впродовж 12 діб після запліднення (така тривалість дослідження обумовлена потребою штучного годування личинок після 14 доби розвитку, оскільки вичерпуються резерви зародкового мішка на цей період розвитку). Для ілюстрації динаміки смертності використовують криві виживання

(рис. 6), які графічно відображають частку особин групи, що вижили. Якщо ж в популяції спостерігається висока смертність на ранніх стадіях (як і в наших дослідженнях), тоді крива стає сильно увігнутою (рис. 6, крива N). Подібним прикладом також є водні безхребетні (наприклад, беззубка), у яких висока смертність спостерігається на стадії вільноплаваючої личинки.

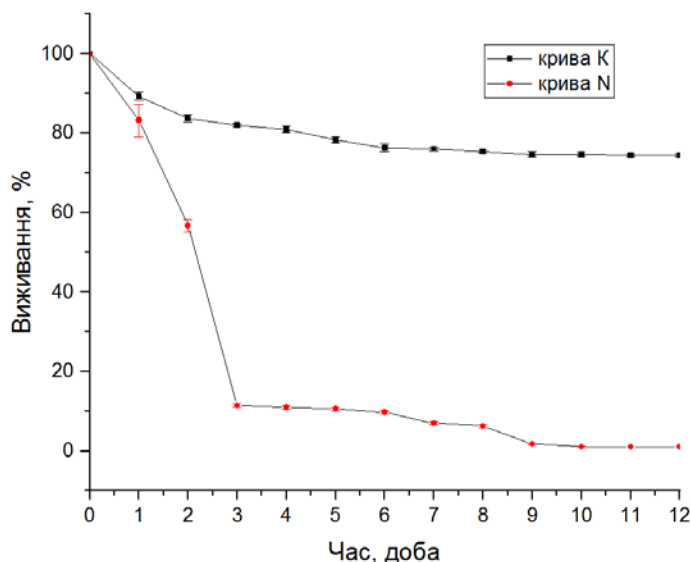


Рис. 6. Криві виживання личинок в'юна впродовж 12 діб розвитку: крива K — виживання личинок в контролі; крива N — виживання личинок за присутності в середовищі інкубації 500 мкмоль/л NaF ($n=3$; $\chi^2 = 189$, $P < 0,001$ — зміни статистично достовірні).

Fig. 6. Curves of survival of the larvae during 12 days of development: curve K — survival of the larvae in the control; curve N — survival of the larvae treated with 500 $\mu\text{mol/L}$ NaF ($n=3$; $\chi^2 = 189$, $P < 0.001$ — changes are statistically significant).

На основі кривих виживаності та застосуванню до них лонгрангового критерію [31] можна стверджувати, що відмінності між кривими K та N є статистично достовірними ($\chi^2 = 189$, $P < 0,001$).

На третю добу розвитку смертність зародків стрімко зросла до 89% ($K_v=11\%$). Після третьої доби розвитку за присутності фториду натрію у середовищі інкубації в середньому за добу гине 36% особин. Починаючи з 6 доби розвитку $K_v=9,8\%$ і зменшувався впродовж досліджуваного періоду. Загальна кількість личинок, що вижили впродовж 12 діб за дії фториду натрію, становить близько 1,1% (10 личинок).

Відомо, що фторид натрію є інгібітором ензимів і взаємодіє з хромосомами, запускаючи генотоксичні ефекти [62]. Найвідомішим механізмом дії фтору на системи ензимів є активація G-білка, який, у свою чергу, ініціює ланцюг подій, що призводять до гальмування роботи іонних каналів, експресії генів та інших метаболічних процесів через систему вторинних месенджерів [44]. Питання щодо участі системи вторинних месенджерів у гальмуванні росту зародків та рухливості личинок, інкубованих з фторидом натрію, потребує подальших досліджень.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень впливу фториду натрію на розвиток та виживання зародків в'юна впродовж періоду раннього розвитку встановлено, що фторид натрію здатен проникати у клітини зародків (враховуючи його біодоступність

[1, 45]), що призводить до порушення функції нервово-м'язової системи й появи дефектів розвитку. Найбільш помітними вадами розвитку, спричиненими фторидом натрію, є достовірне зменшення розмірів голови та хвоста личинок, погана пігментація тіла, зміни діаметру очей та рефлексу дотику зародків. Порушення функції нервово-м'язової системи личинок в'юна власне й проявлялося у зміні координації тіла (неспроможність до прямолінійного руху) та аномальних рухах (обертання навколо осі власного тіла).

Отримані результати підтверджують здатність NaF безпосередньо взаємодіяти з ембріонами, викликаючи появу дефектів розвитку.

Таким чином, на досліджуваній моделі зародків холоднокровних, як і на моделі FETAX [39], продемонстрована пряма тератогенна дія NaF, реалізація якої цілком можлива і в ембріонах людини.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють, що фінансових або інших конфліктів інтересів, які могли вплинути на результати, інтерпретацію та висновки дослідження, не існує.

Authors' ORCID ID

S. M. Mandzynets  <https://orcid.org/0000-0003-3053-628X>

M. V. Bura  <https://orcid.org/0000-0001-7259-204X>

REFERENCES

1. Barbier O, Arreola-Mendoza L, Del Razo LM. Molecular mechanisms of fluoride toxicity. *Chem Biol Interact.* 2010;188(2): 319–33. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2010.07.011>
2. Sharma D, Singh A, Verma K, Paliwal S, Sharma S, Dwivedi J. Fluoride: A review of pre-clinical and clinical studies. *Environ Toxicol Pharmacol.* 2017;56:297–313. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2017.10.008>
3. Whitford GM. Intake and metabolism of fluoride. *Adv Dent Res.* 1994;8(1):5–14. <https://doi.org/10.1177/08959374940080011001>
4. Palczewska-Komsa M, Kalisińska E, Stogiera A, Szmidi M. Fluorides in the human bones – selected issues. *Pomeranian J Life Sci.* 2016;62(1):53–9. (in Polish)
5. Chouhan S, Lomash V, Flora SJS. Fluoride-induced changes in haem biosynthesis pathway, neurological variables and tissue histopathology of rats. *J Appl Toxicol.* 2010;30(1):63–73. <https://doi.org/10.1002/jat.1474>
6. Cicek E, Aydin G, Akdogan M, Okutan H. Effects of chronic ingestion of sodium fluoride on myocardium in a second generation of rats. *Hum Exp Toxicol.* 2005;24(2):79–87. <https://doi.org/10.1191%2F0960327105ht505oa>
7. McIlwain BC, Ruprecht MT, Stockbridge RB. Membrane Exporters of Fluoride Ion. *Annu Rev Biochem.* 2021;90:559–79. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-071520-112507>
8. Berbasova T, Nallur S, Sells T, Smith KD, Gordon PB, Tausta SL, et al. Fluoride export (FEX) proteins from fungi, plants and animals are 'single barreled' channels containing one functional and one vestigial ion pore. *PLoS ONE.* 2017;12(5):e0177096. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177096>
9. Wang AG, Xia T, Chu QL, Zhang M, Liu F, Chen XM, et al. Effects of fluoride on lipid peroxidation, DNA damage and apoptosis in human embryo hepatocytes. *Biomed Environ Sci.* 2004;17(2):217–22.
10. Ha J, Chu Q, Wang A, Xia T, Yang K. Effects on DNA damage and apoptosis and p53 protein expression induced by fluoride in human embryo hepatocytes. *Wei Sheng Yan Jiu.* 2004;33(4):400–2. (in Chinese)
11. Jeng JH, Hsieh CC, Lan WH, Chang MC, Lin SK, Hahn LJ, et al. Cytotoxicity of sodium fluoride on human oral mucosal fibroblasts and its mechanisms. *Cell Biol Toxicol.* 1998;14:383–9. <https://doi.org/10.1023/a:1007591426267>
12. Agalakova NI, Gusev GP. Molecular Mechanisms of Cytotoxicity and Apoptosis Induced by Inorganic Fluoride. *International Scholarly Research Notices.* 2012:403835. <https://doi.org/10.5402/2012/403835>
13. Toft G, Rignell-Hydbom A, Tyrkiel E, Shvets M, Giwercman A, Lindh CH, et al. Semen quality and exposure to persistent organochlorine pollutants. *Epidemiology.* 2006;17(4):450–8. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000221769.41028.d2>
14. Hansen C, Luben TJ, Sacks JD, Olshan A, Jeffay S, Strader L, et al. The effect of ambient air pollution on sperm quality. *Environ Health Perspect.* 2010;118(2):203–9. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901022>

15. Ghosh S, Ghosh D. Impact of fluoride toxicity on fresh water fishes: A mini review. *Int J Adv Innov Res.* 2019;6(2(II)):13–8. Available from: <https://iaraedu.com/pdf/ijair-volume-6-issue-2-ii-april-june-2019.pdf>
16. Cao J, Chen J, Wang J, Wu X, Li Y, Xie L. Tissue distributions of fluoride and its toxicity in the gills of a freshwater teleost, *Cyprinus carpio*. *Aquat Toxicol.* 2012;130–131:68–76. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2012.11.022>
17. Bhatnagar C, Bhatnagar M, Regar BC. Fluoride-induced histopathological changes in gill, kidney, and intestine of fresh water teleost, *Labeo rohita*. *Fluoride.* 2007;40(1):55–61.
18. Shi X, Zhuang P, Zhang L, Feng G, Chen L, Liu J, et al. Growth inhibition of Siberian Sturgeon (*Acipenser Baerii*) from dietary and waterborne fluoride. *Fluoride.* 2009;42(2):137–41. Available from: https://www.fluorideresearch.org/422/files/FJ2009_v42_n2_p137-141.pdf
19. Vishal R, Gaur R. Impact of high sodium fluoride concentration on length-weight relationship and condition factor in *Puntius ticto* of lake Nainital, India. *Journal of Global Biosciences.* 2015;4(1):1180–5. Available from: <https://www.mutagens.co.in/jgb/vol.04/1/09.pdf>
20. Chen S, Boling L, Lin S, Huang Y, et al. Change of urinary fluoride and bone metabolism indicators in the endemic fluorosis areas of southern china after supplying low fluoride public water. *BMC Public Health.* 2013;13:156. Available from: <http://www.biomedcentral.com/1471-2458/13/156>
21. Bajpai S, Tripathi M. Retardation of growth after fluoride exposure in catfish, *Heteropneustes fossilis* (Bloch). In: *Bioresources Rural Livelihood. Vol-I Genetics, Biochemistry and Toxicology.* 2010. Bio-Green Books. P. 67–173.
22. Yadav SS, Kumar R, Tripathi M. Effects of fluoride exposure on some enzymatic and histopathological changes in the liver of *Heteropneustes fossilis* (Bloch). *Int J Fauna Biol Stud.* 2014;1(5):80–4. Available from: <https://www.faunajournal.com/archives/2014/vol1issue5/PartB/16.1-632.pdf>
23. Kale MD, Muley DV. Biochemical Alteration In Fresh Water Fish *Labeo Rohita* Exposed To The Sodium Fluoride (NAF). *IOSR J Environ Sci Toxicol Food Technol.* 2015;9:48–52. <https://doi.org/10.9790/2402-09134852>
24. Tripathi N, Bajpai S, Tripathi M. Genotoxic alterations induced by Fluoride in Asian catfish, *Clarias batrachus* (Linn.). *Fluoride.* 2009;42(4):292–6. Available from: https://fluorideresearch.org/424/424/files/FJ2009_v42_n4_p292-296.pdf
25. Ghosh S, Pal S, Ghosh D, Saha K, Syamal AK. Hepatotoxic effects of Sodium Fluoride on *Channapunctatus*. *Int J Sci Res Rev.* 2018;7(3):1458–69. Available from: https://www.ijr.org/down_1316.php
26. Fu M, Wu X, He J, Zhang Y, Hua S. Natrium Fluoride Influences Methylation Modifications and Induces Apoptosis in Mouse Early Embryos. *Environ Sci Technol.* 2014;48(17):10398–405. <https://doi.org/10.1021/es503026e>
27. Izquierdo-Vega JA, Sanchez-Gutierrez M, Del Razo LM. Decreased *in vitro* fertility in male rats exposed to fluoride-induced oxidative stress damage and mitochondrial transmembrane potential loss. *Toxicol Appl Pharmacol.* 2008;230(3):352–7. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2008.03.008>
28. Spittle B. Halting the inertia of indifference: fluoride and fertility revisited. *Fluoride.* 2009;42(3):159–61. Available from: https://www.fluorideresearch.org/423/files/FJ2009_v42_n3_p159-161.pdf
29. Sun Z, Niu R, Su K, Wang B, Wang J, Zhang J, et al. Effects of sodium fluoride on hyperactivation and Ca²⁺ signaling pathway in sperm from mice: an *in vivo* study. *Arch Toxicol.* 2010;84:353–61 <https://doi.org/10.1007/s00204-009-0508-x>
30. Kwon WS, Rahman MS, Pang MG. Diagnosis and prognosis of male infertility in mammal: the focusing of tyrosine phosphorylation and phosphotyrosine proteins. *J Proteome Res.* 2014;13(11):4505–17. <https://doi.org/10.1021/pr500524p>
31. Bantle JA, Finch RA, Fort DJ, Stover EL, Hull M, Kumsher-King M, et al. Phase III interlaboratory study of FETAX part 3. FETAX validation using 12 compounds with and without an exogenous metabolic activation system. *J. Appl. Toxicol.* 1999;19(6):447–72. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1263\(199911/12\)19:6%3C447::aid-jat601%3E3.0.co;2-4](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1263(199911/12)19:6%3C447::aid-jat601%3E3.0.co;2-4)
32. Fort DJ, Stover EL, Farmer DR, Lemen JK. Assessing the predictive validity of frog embryo teratogenesis assay – *Xenopus* (FETAX). *Teratog Carcinog Mutagen.* 2000;20(2):87–98. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6866\(2000\)20:2%3C87::AID-TCM4%3E3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6866(2000)20:2%3C87::AID-TCM4%3E3.0.CO;2-6)
33. Goyda OA. Biofizicheskiye aspekty rannego ontogeneza zhivotnykh. [Biophysical aspects of animal early ontogenesis] Kiev: Naukova dumka; 1993. 224 p. (In Russian).
34. Boiko N, Celevycz M, Sanagurski D. The heavy metal ion influence on the Na⁺, K⁺-ATPase activity and the dynamic of transmembrane potential of loach embryos. *Visnyk of Lviv University. Biological series.* 2002;29:25–31. (In Ukrainian).
35. Semochko O, Bura M, Mandzynets S, Ferensovich Y, Bilyj O, Sanagurski D. Morphological changes loach embryos and larvae *Misgurnus fossilis* L. for action with led blue type light. *Biophysical bulletin.*

- 2010;24:103–10. (In Ukrainian). Available from: <https://periodicals.karazin.ua/biophysvisnyk/article/view/3998/3557>
36. Verholyas MR, Honcharuk VV. Vykorystannya tsytolohichnykh biomarkeriv na rybakh dlya otsinky antropohennoho zahryaznennya mors'kykh ta prisnykh vod [переклад англійською]. In: Kunakha VA, et al, editors. Faktory eksperymental'noyi evolyutsiyi orhanizmiv: zb. nauk. prats' [переклад англійською]. 2008;4:48–50 (In Ukrainian).
 37. Neifakh AA, Timofeeva MYa. Problemy regulyatsii v molekulyarnoy biologii razvitiya. [Molecular Biology of Development: Problems of regulation]. M.: Nauka; 1978. 336 p. (In Russian).
 38. OECD. Test No. 212: Fish, Short-term Toxicity Test on Embryo and Sac-Fry Stages. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. Paris: OECD Publishing, 1998. 20 p. <https://doi.org/10.1787/9789264070141-en>
 39. Goh EH, Neff AW. Effects of fluoride on *Xenopus* embryo development. Food Chem Toxicol. 2003;41(11):1501–8. [https://doi.org/10.1016/s0278-6915\(03\)00166-2](https://doi.org/10.1016/s0278-6915(03)00166-2)
 40. Belousov LV, Dabyagan NV, Chunaeva MZ. Posobiye k bol'shomu praktikumu po embriologii [The manual for a large workshop on the embryology]. M.: MSU Publishing House, 1990; P.1. 104 p. (In Russian).
 41. Glants S. Mediko-biologicheskaya statistika [Medical and biological statistics]. M.: Praktika, 1998. 459 p. (In Russian).
 42. Shi J, Dai G, Zhang Z. Relationship between bone fluoride content, pathological change in bone of aborted fetuses and maternal fluoride level. Zhonghua Yu Fang Yi Xue Za Zhi. 1995;29(2):103–5. (in Chinese)
 43. Zhukova AG, Ulanova EV, Shcherbakova DA, Yadykina TK. Dynamics of compensatory mechanisms at early stages of fluorine intoxications. Technologies of living systems. 2011;8(1):10–7. (in Russian)
 44. Yang S, Wang Z, Farquharson C, Alkadir R, Zahra M, Ren G, et al. Sodium fluoride induces apoptosis and alters bcl-2 family protein expression in MC3T3-E1 osteoblastic cells. Biochem Biophys Res Commun. 2011;410(4):910–5. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2011.06.094>
 45. Camargo JA. Fluoride toxicity to aquatic organisms: a review. Chemosphere. 2003;50(3):251–64. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(02\)00498-8](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(02)00498-8)
 46. DenBesten P, Li W. Chronic Fluoride Toxicity: Dental Fluorosis. Monogr Oral Sci. 2011;22:81–96. <https://doi.org/10.1159/000327028>
 47. Bagday A, Zdvizhkov Y, Mandzynets S, Bura M. Morphological aspects of influence of newly synthesized polymers on the development of loach embryos and larvae during early embryogenesis. Visnyk of Lviv University. Biological series. 2014;68:69–78. (In Ukrainian). Available from: <http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/biology/article/view/4503/4541>
 48. Chowdhury C, Khijmatgar S, Kumari DP, Chowdhury A, Grootveld M, Hegde C, et al. Fluoride in fish flesh, fish bone and regular diet in south-coastal area of Karnataka state of India. Indian J Dent Res. 2018;29(4):414–7. https://doi.org/10.4103/ijdr.IJDR_653_16
 49. Pak CY, Zerwekh JE, Antich P. Anabolic effects of fluoride on bone. Trends Endocrinol Metab. 1995;6(7):229–34. [https://doi.org/10.1016/1043-2760\(95\)00111-t](https://doi.org/10.1016/1043-2760(95)00111-t)
 50. Lau KHW, Baylink DJ. Molecular Mechanism of Action of Fluoride on Bone Cells. J Bone Miner Res. 1998;13(11):1660–7. <https://doi.org/10.1359/jbmr.1998.13.11.1660>
 51. Tripathi A, Tripathi N, Kumar A, Tripathi M. Effect of fluoride on vertebral column of a freshwater fish *Channa punctatus*. J Appl Biosci, 2006;32(2):164–7.
 52. Strunecka A, Patocka J, Blaylock RL, Chinoy NJ. Fluoride interactions: From molecules to disease. Current Signal Transduction Therapy. 2007;2(3):190–213. <https://doi.org/10.2174/157436207781745300>
 53. Dumont JN, Schultz TW, Buchanan MV, Kao GL. Frog embryo teratogenesis assay: *Xenopus* (FETAX)-A short-term assay applicable to complex environmental mixtures. In: Waters MD, Sandhu SS, Lewtas J, Claxton L, Chernoff N, Nesnow S. (eds) Short-Term Bioassays in the Analysis of Complex Environmental Mixtures III. Environmental Science Research, vol 27:393-405. Springer, Boston, MA. 1983. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3611-2_27
 54. Mullenix PJ, Denbesten PK, Schunior A, Kernan WJ. Neurotoxicity of sodium fluoride in rats. Neurotoxicol Teratol. 1995;17(2):169-77. [https://doi.org/10.1016/0892-0362\(94\)00070-t](https://doi.org/10.1016/0892-0362(94)00070-t)
 55. Bartos M, Gumilar F, Bras C, Gallegos CE, Giannuzzi L, Cancela LM, et al. Neurobehavioural effects of exposure to fluoride in the earliest stages of rat development. Physiol Behav. 2015;147:205-12. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.04.044>
 56. Varner JA, Jensen KF, Horvath W, Isaacson RL. Chronic administration of aluminum-fluoride or sodium-fluoride to rats in drinking water: alteration in neuronal and cerebrovascular integrity. Brain Res. 1998;784(1–2):284–98. [https://doi.org/10.1016/s0006-8993\(97\)01336-x](https://doi.org/10.1016/s0006-8993(97)01336-x)
 57. Takahashi K. Fluoride-linked Down syndrome births and their estimated occurrence due to water fluoridation. Fluoride 1998;31(2):61–73. Available from: <https://fluoridealert.org/wp-content/uploads/takahashi-1998.pdf>

58. Kravtsova VV, Kravtsov OV. Inactivation of Na⁺,K⁺-ATPase from cattle brain by sodium fluoride. Ukr Biokhem J. 2004;76(1):39–47. (In Ukrainian). Available from: <http://ubj.biochemistry.org.ua/index.php/en/journal-archive/2004/n-1-january-february-79760/592-inactivation-of-n-ase-from-cattle-brain-by-sodium-fluoride-kravtsova-vv-kravtsov-av>
59. Waugh DT. Fluoride exposure induces inhibition of sodium-and potassium-activated adenosine triphosphatase (Na⁺, K⁺-ATPase) enzyme activity: Molecular mechanisms and implications for public health. Int J Environ Res Public Health. 2019;16(8):1427. <https://doi.org/10.3390/ijerph16081427>
60. Guna Sherlin DM, Verma RJ. Vitamin D ameliorates fluoride-induced embryotoxicity in pregnant rats. Neurotoxicol Teratol. 2001;23(2):197–201. [https://doi.org/10.1016/s0892-0362\(00\)00123-9](https://doi.org/10.1016/s0892-0362(00)00123-9)
61. Blakely TA, Woodward AJ. Ecological effects in multi-level studies. J Epidemiol Community Health. 2000;54(5):367–374. <https://doi.org/10.1136/jech.54.5.367>
62. Zeiger E, Shelby MD, Witt KL. Genetic toxicity of fluoride. Environ Mol Mutagen. 1993;21(4):309–18. <https://doi.org/10.1002/em.2850210402>

INFLUENCE OF THE SODIUM FLUORIDE ON THE DEVELOPMENT AND SURVIVAL OF THE LOACH EMBRYOS

I. R. Grytsaj, S. M. Mandzynets^{id}, M. V. Bura^{id}

Ivan Franko National University of Lviv, 4 Hrushevskoho st., Lviv, Ukraine, 79005

Submitted July 16, 2021; Revised February 9, 2022;

Accepted February 17, 2022

Background: The study of fluoride effects at the cellular level is still essential for biophysics, medicine, and ecology as one of the most common environmental pollutants. Its impact on embryonic objects is poorly understood.

Objectives: The aim of the work was: 1) to study the effect of sodium fluoride (in the minimum concentration to inhibit growth) on the morphological development of loach embryos; 2) evaluation of the degree of survival of embryos in the presence of sodium fluoride in the incubation medium and determination of the coefficient K_s .

Materials and methods: Ovulation in loach females (*Misgurnus fossilis* L.) was stimulated by intramuscular injection of female chorionic gonadotropin (500 units), eggs were obtained by 36 h after stimulation, fertilized in Petri dishes with a suspension of sperm according to Neifach A. A. The stages of development were observed visually used a binocular microscope MBS-9 with a photo camera. The experimental embryos were incubated in Goltfreter's solution with the addition of sodium fluoride to a final minimum concentration to inhibit growth of 500 $\mu\text{mol/l}$.

Results: Sodium fluoride inhibits the development of loach embryos and leads to developmental defects. The noticeable developmental defects caused by sodium fluoride were a reduction in the size of the larvae's head and tail, low body pigmentation, changes in the eye diameter, and embryonic touch reflex. As a result of the accumulation of fluoride in embryonic cells, on the third day of development, embryonic mortality increased to 88,9%. On 12 days under the action of sodium fluoride, the total number of larvae was about 2%.

Conclusions: The ability of NaF to act as a direct teratogen was tested on the cold-blooded embryo model, the same effect was found by other investigators on the FETAX model. The possibility that sodium fluoride may cause toxic and/or neuromuscular developmental defects in human embryos also should be considered. Avoiding excessive getting of fluoride in the body by limiting the consumption of foods or beverages high in fluoride, the use of fluoride in dental care products, etc. requires detailed assessment.

KEYWORDS: sodium fluoride; morphology; survival; embryos; loach; developmental defects.

ДІЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-03>

УДК 581.144:581.19:58.035.4

ФОТОМОРФОГЕНЕЗ ТА ВМІСТ ВУГЛЕВОДІВ В ОСЬОВИХ ОРГАНАХ
ПРОРОСТКІВ ГОРОХУ ПОСІВНОГО ЗА ДІЇ СЕЛЕКТИВНОГО СВІТЛАВ. В. Жмурко, О. О. Авксентьєва^{id}, Є. Д. Батуєва^{id}

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,

майдан Свободи, 4, м. Харків, Україна, 61022

e-mail: batuyeva96@gmail.com

Надійшла до редакції 16 липня 2021 р. Переглянута 22 грудня 2021 р.

Прийнята до друку 10 лютого 2022 р.

Актуальність. Світло, що є багатограним екзогенним фактором, грає важливу роль в процесах росту та розвитку рослин. Спектральний склад світла є вирішальним для регуляції фотоморфогенетичних процесів. На цей час у рослин виділяють кілька груп фоторецепторів, до яких відносять рецептори червоного (ЧС) і далекого червоного світла (ДЧС) — фітохромі; рецептори ультрафіолетового випромінювання А-діапазону, синього (СС) і зеленого (ЗС) світла — криптохромі, фототропіни, білки сімейства ZEITLUPE, а також рецептор УФ-В — білок UVR8. Одним із можливих механізмів, шляхом якого реалізуються ефекти активації фоторецепторних систем у рослині, можуть бути зміни обміну вуглеводів. Дослідження морфогенетичних реакцій проростків за дії опромінення селективним світлом шляхом активації фоторецепторних систем є важливим для розуміння механізмів регуляції програми онтогенезу рослинного організму.

Метою даної роботи було дослідити вплив селективного світла різних спектрів: ЧС (660 нм), ЗС (530 нм) та СС (450 нм) на ростові реакції, морфогенез та вміст розчинних вуглеводів у різних осьових органах проростків рослин з довгоденною фотоперіодичною реакцією.

Матеріали та методи. Досліди проводили на 10-добових етіологованих проростках гороху посівного сорту Меценат. Активацію фоторецепторних систем червоним (ЧС, 660 нм), зеленим (ЗС, 530 нм) та синім (СС, 450 нм) світлом проводили протягом 5-ти діб по 30 хвилин за допомогою LED матриць. Аналізували ростову реакцію, морфогенез та вміст розчинних моно- та олігоцукрів в осьових органах проростків.

Результати. Осьові органи проростків розрізняються за реакцією на опромінення селективним світлом. Коренева система є більш чутливою до дії селективного світла ніж надземна частина проростків довгоденної рослини гороху посівного сорту Меценат. За активації фоторецепторних систем стимулюються ростові процеси, активуються процеси фотоморфогенезу та біосинтезу олігоцукрів *de novo*, найбільш вірогідно сахарози. Серед спектрів селективного світла максимально стимулюючий ефект проявляє опромінення ЗС (530 нм) в реакціях надземної частини та коренів. ЧС (660 нм) та СС (450 нм) проявляють протилежні ефекти: ЧС запускає фотоморфогенетичну програму розвитку надземної частини, а СС — більш впливає на фотоморфогенез коренів.

Висновки. Різний рівень ростових, морфогенетичних процесів та зміни у вмісті розчинних вуглеводів, вірогідно пов'язані зі здатністю систем фоторецепторів активувати реалізацію різних

Як цитувати: Жмурко ВВ, Авксентьєва ОО, Батуєва ЄД. Фотоморфогенез та вміст вуглеводів в осьових органах проростків гороху посівного за дії селективного світла. Біофізичний вісник. 2022;47:27–39. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-03>

In cites: Zhmurko VV, Avksentieva OO, Batuyeva YD. Photomorphogenesis and content of carbohydrates in the axial organs of field pea seedlings under the influence of selective light. Biophysical Bulletin. 2022;47:27–39. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-03> (in Ukrainian)

Open Access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

шляхів фотоморфогенезу в осьових органах проростків під впливом опромінення селективним світлом певного спектру.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *Pisum sativum* L.; червоне світло (660 нм); зелене світло (530 нм); синє світло (450 нм); фотоморфогенез; розчинні вуглеводи.

Світло, що грає важливу роль в розвитку рослин, є багатограним фактором, який характеризується наступними параметрами: діапазон довжини хвилі (спектр), інтенсивність, інтегральна добова радіація, фотоперіод і напрямок. Особливо важливим фактором є довжина світлової хвилі, тому що саме спектральний склад світла є вирішальним для регуляції процесів росту і розвитку рослин, а також для оптимізації морфогенетичних процесів. Спектр світла ділиться на наступні області: 380 нм і менше — ультрафіолетова; 380–430 нм — фіолетова; 430–490 нм — синя; 490–570 нм — зелена; 570–600 нм — жовта; 600–780 нм — червона; 780 нм і більше — інфрачервона. Як відомо, для життєдіяльності рослин важлива фотосинтетично активна частина спектру, що знаходиться в межах від 380 до 710 нм, а також фізіологічно-активна частина, що має довжину хвилі 300–800 нм. Найбільш значущим є червоне світло (ЧС), спектр якого знаходиться в межах 600–720 нм, тому що ця частина спектра є основним постачальником енергії для фотосинтезу та впливає на процеси, пов'язані зі зміною швидкості розвитку рослини [1, 2].

В даний час у рослин виділяють п'ять груп фоторецепторів, що сприймають інформацію про умови освітлення, тривалість світлового дня та інших факторів навколишнього середовища. До таких рецепторів відносяться рецептори червоного (ЧС) і далекого червоного світла (ДЧС) — фітохромі; рецептори, що сприймають ультрафіолетове випромінювання А-діапазону, синє (СС) і зелене (ЗС) світло — кріптохромі, фототропіни, білки сімейства ZEITLUPE, а також рецептор ультрафіолетового випромінювання В-діапазону (УФ-В) — білок UVR8 [3]. Також було зроблено припущення, що в рослинах функціонують й інші, ще не відомі, фоторецептори, в тому числі, специфічні до ЗС [3, 4]. Сукупність даних фоторецепторів дозволяє рослинному організму орієнтуватися в умовах навколишнього середовища і адекватно реагувати на їх зміни, що є необхідним для виживання та успішного розмноження: вхід у стан спокою і вихід з нього, зміна швидкості росту, перехід до цвітіння або його затримка, напрямок росту, утворення бічних пагонів, а також регуляція синтезу летких речовин, що впливають на зростання сусідів або патогенів, або включення реакції апоптозу — «запрограмованої клітинної загибелі» [1, 3].

Одним з основних фоторецепторних комплексів рослин є система фітохромів, яка сприймає сигнал в області червоного (660 нм) і далеко-червоного світла (730 нм). На сьогоднішній день досліджені фізико-хімічні властивості фітохромів [2], виявлені різні форми фітохромів у рослини *Arabidopsis thaliana* — Phy A-E [5], особливості їх локалізації в клітині і біосинтезу, основні молекулярні механізми трансдукції фітохромного сигналу та його інтеграція з фітогормональним і стресовим сигналінгом [6]. Фітохромна система контролює практично весь хід індивідуального розвитку рослин — від проростання насіння до зацвітання і плодоношення. Фітохромі контролюють процеси фотосинтезу, утворення продуктів асиміляції, біологічно активних речовин, перехід до цвітіння, спокою, продуктивність рослин та ін. [2, 7].

Рецепторними системами, що сприймають синє світло, є комплекси фототропінів, білків сімейства ZEITLUPE і кріптохромі. За літературними даними, синє світло характеризується як основний компонент морфогенезу [8]. Відомо, що сині й фіолетові (380–490 нм) промені, як і ЧС, беруть безпосередню участь у фотосинтезі, стимулюють утворення білків і регулюють швидкість розвитку рослини. Фототропіни, рецептори СС, регулюють такі процеси рослин, як фототропізм пагона, кореня і листя,

переміщення хлоропластів у відповідь на світлові й температурні сигнали, регуляцію рухів продихів [9]. Білки сімейства ZEITLUPE контролюють добові циркадні ритми (білок ZTL), перехід до цвітіння (FKF1), а білок LKP1 необхідний для обох процесів [3]. Кріптохроми, в свою чергу, беруть участь в регуляції циркадних ритмів, цвітіння, СС-залежного фотоморфогенезу, а також регулюють інші функції рослин [10].

Довгий час вважалося, що зелене світло є фізіологічно неактивною частиною спектра, так як колір листя переважної більшості рослин зелений, що наводить на думку, що зелене світло рослини відбивають, а не використовують як джерело енергії. Однак було відзначено, що певний баланс зеленого і синього світла важливий для ефекту уникнення тіні [7], а рецепторами, які вловлюють співвідношення СС/ЗС, є кріптохроми [10]. На даний час рецептор зеленого світла не відомий, проте передбачається, що в рецепції цієї частини спектра бере участь фітохромна і кріптохромна системи. Опромінення ЗС призводить до оборотності викликаних СС накопичення антоціанів, ініціації цвітіння і відкриття продихів, активації вуглецевого метаболізму в рослинах [4]. Існування таких реакцій, викликаних опроміненням ЗС, дає можливість зробити припущення, що існує окремий фоторецептор зеленого світла, можливо, зеаксантинового типу [4].

Одним з можливих механізмів, шляхом якого реалізуються ефекти активації фоторецепторних систем у рослині, можуть бути зміни в обміні вуглеводів. Таке припущення виправдане особливостями функцій вуглеводів у рослинному організмі. Загально відомо, що вуглеводи — основний енергетичний та пластичний матеріал, який, фактично, забезпечує перебіг всіх процесів життєдіяльності рослини. Показано, зокрема, що центральним шляхом, який регулює використання асимілятів на ріст, розвиток, а відтак і на продукційний процес, є взаємоперетворення крохмалю, сахарози та гексоз [11]. Вагомою є також сигнальна функція вуглеводів, яка проявляється у їх здатності брати участь у експресії генів [12]. Вуглеводи задіяні у трансдукції сигналів, які пов'язані з фітогормональним та іншим сигналінгом [6]. Показано також, що вуглеводи, поряд з фітогормонами, грають істотну роль у комплементарній системі регуляції темпів розвитку фотоперіодично-чутливих рослин, а також рослин озимого та ярого типу розвитку [13].

Відомо, що для рослинного організму характерні видоспецифічні особливості у метаболічних процесах. Тому не виключено, що у рослин різних видів можуть проявлятися специфічні особливості у сприйнятті, трансдукції і прояві ефектів активації фоторецепторних систем. Можливо також, що подібна специфічність цих ефектів може бути пов'язана з приналежністю рослин до тих чи інших екологічних груп. Зокрема, рослини одного і того ж виду, але з різним типом фотоперіодичної реакції, по-різному реагують на активацію фітохромів. Показано, що опромінення червоним світлом (660 нм) у середині темного періоду у короткоденному фотоперіодичному циклі у довгоденних рослин не викликало змін у строках переходу до цвітіння, а у короткоденних — зумовлювало їх істотне подовження. Встановлено також, що переривання темного періоду у короткоденному фотоперіодичному циклі викликало істотну затримку переходу до колосіння у короткоденних сортів пшениці озимої, прискорювало перехід до колосіння у довгоденних сортів і не змінювало його у фотоперіодично-нейтральних сортів [13]. Ці результати можуть свідчити, що фітохромні ефекти у регуляції розвитку вагомі для короткоденних рослин, в той час як для довгоденних, можливо, більш вагомими є ефекти інших фоторецепторів.

Як правило, переважна більшість досліджень ефектів активації фітохромів та інших фоторецепторів проведена з модельним об'єктом *Arabidopsis thaliana* [5, 9] та іншими рослинами без урахування їх фотоперіодичної реакції. Такий підхід, до певної міри,

звужує уявлення щодо можливого прояву специфічності ефектів активації фітохромів у рослин різних екологічних груп з різним типом фотоперіодичної реакції.

Отже, метою даної роботи було дослідити вплив селективного світла різних спектрів: ЧС (660 нм), ЗС (530 нм) та СС (450 нм) на ростові реакції, морфогенетичний розвиток та вміст розчинних вуглеводів у різних осьових органах проростків рослин з довгоденною фотоперіодичною реакцією.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Рослинний матеріал. В роботі використовували горох посівний (*Pisum sativum* L.) сорту Меценат — рослини з довгоденною фотоперіодичною реакцією. Досліджений сорт внесений до Державного реєстру сортів рослин України. Насіння для досліджень було надане співробітниками Інституту рослинництва ім. В. Я. Юр'єва НААН України.

Дизайн дослідження. Насіння поетапно стерилізували в 15 %-ому розчині гіпохлориту натрію (15 хвилин) і 70 %-ному етанолі (1 хвилинка) і пророщували в чашках Петрі по 10–15 насінин на зволоженому фільтрувальному папері при температурі 22°C в темряві в термостаті (ТСО-80, MICROmed) протягом 3-х діб для стабілізації ростової реакції. Після чого проводили активацію фоторецепторних систем досліджуваних проростків шляхом опромінення світлом різного спектру. Етіольовані проростки в ізольованому боксі в темряві опромінювали щодня по 30 хвилин (5 днів) за допомогою LED матриці Коробова червоним світлом (ЧС 660 нм), зеленим (ЗС 530 нм) та синім (СС 450 нм) з інтенсивністю освітлення 120 мВт/м². Припускаємо, що під час опромінювання температура проростків не змінювалася. Контрольні рослини культивували за тих же умов (темрява, 100% вологість, температура 22°C) без активації фоторецепторних систем селективним світлом. На 10-ту добу експерименту проводили аналіз ростової реакції проростків, їх морфогенетичного розвитку та визначення вмісту цукрів.

Аналіз ростової реакції. Ростову реакцію визначали за показниками лінійного росту, вимірюючи довжину надземної частини і кореневої системи, а також для характеристики біосинтетичних процесів визначали накопичення біомаси осьовими органами проростка.

Морфогенетичний розвиток. Морфогенез надземної частини проростка аналізували за формуванням розгорнутих апікальних гачків та появою нових метамерів — міжвузль. Ризогенез — формування кореневої системи проростка — аналізували за показниками кількості та довжини бокових (латеральних) коренів та формування зони всмоктування — ризодерми. Площу зони ризодерми визначали за допомогою мікроскопа (ЛОМО Мікмед (Росія) при збільшенні $\times 120$), виготовляючи тимчасові «давлені» препарати головного кореня проростка. Вимірювали середню довжину кореневих волосків та зони всмоктування за допомогою окуляр-мікрометра.

Аналіз вмісту водорозчинних вуглеводів. Вміст вуглеводів визначали за Швецовим і Лукьяненко [14]. Принцип методу полягає у здатності редуруючих цукрів відновлювати феріціанід калію до фероціаніду у лужному середовищі. Відновлена сполука при взаємодії з Fe₂(SO₄)₃ утворює стійке синє забарвлення, оптична щільність якого пропорціональна вмісту цукрів. Цей показник вимірювали за допомогою фотоелектроколометра КФК-2МП з червоним світлофільтром 610 нм. Екстракцію цукрів проводили етанолом при 70°C 30 хв. Безпосередньо в екстракті визначали вміст моноцукрів. Для визначення суми цукрів їх переводили у редукуючі шляхом гідролізу аліквоти екстракта у 1 н НСІ при 70°C 5 хв. Вміст олігоцукрів розраховували за різницею вмісту суми та моноцукрів. Концентрацію вуглеводів розраховували з

використанням калібрувального графіка, побудованого з використанням глюкози (SIGMA), та виражали у мг/г маси сухої речовини.

Статистичний аналіз. Всього проведено 3 біологічні серії експериментів. Статистичну обробку отриманих даних проводили за допомогою пакета програми Statistica 6.0. Істотність відмінностей між варіантами визначали з використанням t-критерію Стюдента з урахуванням поправки Бонферонні. У таблицях і на графіках наведені середні значення та їх стандартні похибки.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Результати визначення активації фоторецепторних систем на ростові процеси етіюльованих проростків гороху Меценат показали істотну залежність маси проростків від опромінення їх світлом певної довжини хвилі (рис. 1 А). Так, за впливу червоного світла (ЧС 660 нм), яким активується система фітохромів, біомаса надземної частини проростків істотно збільшувалася порівняно з масою у контрольному варіанті досліду. Порівняно до контролю збільшувалася також і маса надземної частини проростків за опромінення зеленим (ЗС 530 нм) та синім світлом (СС 450 нм). Однак збільшення маси за опромінення ЗС і СС було значно меншим, ніж те, яке відбувалося за опромінення червоним світлом (рис. 1 А). Оскільки застосовані нами спектри опромінення збуджують різні фоторецептори [3] і при цьому проявляється істотний ефект на біосинтетичні процеси, то, вірогідно, що у надземній частині етіюльованих проростків гороху сорту Меценат присутні фітохроми, криптохроми та, можливо, фототропіни. Аналіз результатів показав, що за рівнем прояву ефектів на біомасу надземної частини дію спектрів світла можна ранжувати наступним чином ЧС>ЗС≥СС. Вірогідно, що це може свідчити про різний вміст чи/або різні форми або ж різну активність фоторецепторів у надземній частині проростків. Зокрема відомо, що ефекти фітохромів залежать від їх вмісту та форми — R_hуV найбільш активний серед інших форм саме у надземній частині рослини [3, 15].

Визначення біомаси коренів показало дещо інші результати, щодо ефектів активації фоторецепторних систем, порівняно до її ефектів у надземній частині (рис. 1 А). Опромінення ЧС та ЗС зумовило збільшення біомаси коренів проростків, а опромінення СС — незначне її зменшення порівняно до маси у контрольному варіанті (рис. 1 А). На відміну від ефектів у надземній частині, у коренях найбільш значне збільшення біомаси виявлене при опроміненні ЗС порівняно до збільшення за дії ЧС та СС. Причому у коренях ЗС викликало дещо більший ефект, ніж у надземній частині проростка. В той же час ефекти від опромінення коренів ЧС і СС були значно меншими, ніж такі ефекти у надземній частині. Це дає підставу припустити, що надземна і підземна частина етіюльованих проростків гороху сорту Меценат відрізняються за активністю та складом фоторецепторів червоного, зеленого і синього світла. Вірогідно, що для дослідженої рослини характерна органна специфічність за складом і біосинтезом фоторецепторів. Це припущення підтверджується даними літератури, які показали наявність різних форм фітохромів у асиміляційному апараті та коренях арабідопсису [5, 7]. Також специфічні ефекти опромінення селективним світлом різного спектру на ростову реакцію етіюльованих проростків довгоденної культури гороху посівного сорту Меценат, можливо, пов'язані з різним ступенем оводненості осьових органів проростків та температурним впливом опромінення світлом різного спектру, що потребує більш детальних подальших досліджень.

Отже, активація різних фоторецепторних систем у надземній частині посилює біосинтетичні процеси, в той час як у коренях таке посилення відбувається тільки за активації рецепторів червоного і, особливо істотно, зеленого світла.

Вивчення впливу активації фоторецепторів на лінійний ріст проростків — довжину надземної частини і коренів — показали, що лінійний ріст надземної частини відбувався значно повільніше, ніж коренів, незалежно від варіанту досліду (рис. 1 Б).

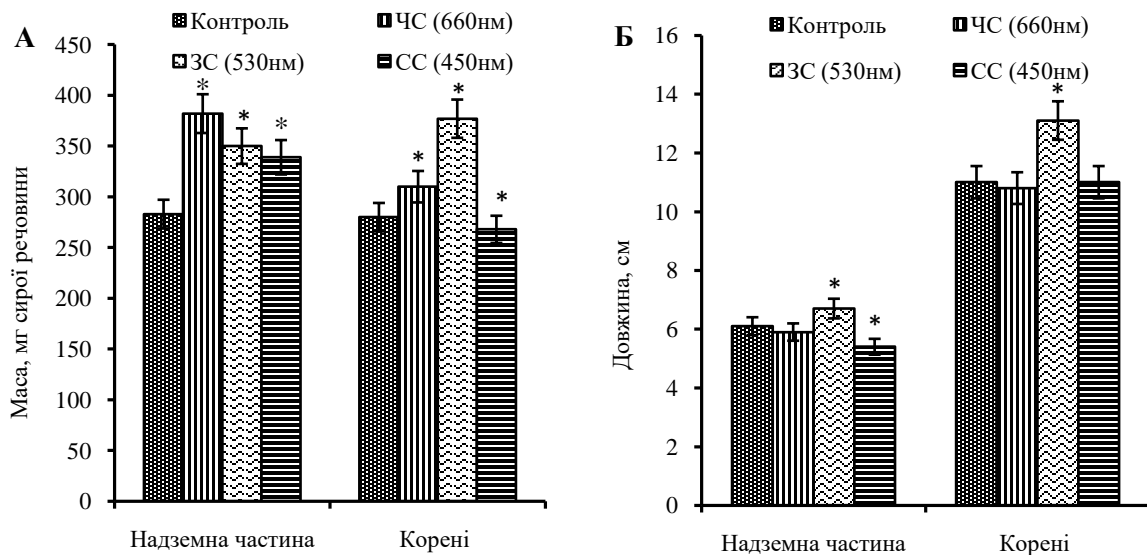


Рис. 1 Вплив опромінення селективним світлом на біомасу (А) та довжину (Б) осьових органів проростків гороху сорту Меценат ($m \pm \sigma$). * — різниця з контролем істотна при $P \leq 0,017$.

Fig. 1 The influence of selective light irradiation on the biomass (A) and length (B) of the axial organs of Metsenat pea seedlings ($m \pm \sigma$). * — the difference with the control is significant at $P \leq 0.017$

Разом з тим, лінійний ріст як надземної частини, так і коренів залежав від довжини хвилі світла, яким опромінювали проростки. На ріст надземної частини червоне світло не впливало, зелене світло його стимулювало, а синє світло пригнічувало порівняно до росту у контрольному варіанті. Серед усіх застосованих для опромінення довжин хвиль світла найбільший ефект на ріст надземної частини проростка у довжину проявляло зелене світло (рис. 1 Б). Той факт, що лінійний ріст за опромінення червоним та синім світлом гальмується, вірогідно, може свідчити про перехід від етіюльованого стану проростка — програми скотоморфогенезу до реалізації програми фотоморфогенезу, яка запускається деградацією COP1 — головного репресора фотоморфогенезу, бо відомо, що саме червоне та синє світло (фітохромі і кріптохромі) запускають процеси фотоморфогенезу [15, 16]. Щодо лінійного росту коренів, то він не залежав від дії червоного і синього світла, але істотно активувався при дії зеленого світла порівняно до росту коренів у неопромінених проростках (рис. 1 Б). Вірогідно, що у кореневій системі дещо інший склад фоторецепторів, ніж у надземній частині [3], можливо також, що у зв'язку з цим зелене світло у коренях виступає фактором деетіюляції, про що може свідчити посилення лінійного росту коренів, яке характерне для цього процесу (рис. 1 Б).

Отже, за результатами дослідження ростової реакції в осьових органах етіюльованих проростків гороху посівного показано, що активація фоторецепторних систем за опромінення ЧС (660 нм) та СС (450 нм) гальмує або суттєво не впливає на показники лінійного росту як в надземній частині проростку, так і в коренях. Інгібування росту гіпокотилей та коренів за дії ЧС та СС також показано на модельній культурі *Arabidopsis thaliana* [5, 9], що свідчить про неспецифічний характер ростової

реакції осьових органів проростків дводольних рослин на активацію фіто- та криптохромів. В той же час виявлений в наших експериментах стимулюючий ефект опромінення ЗС (530 нм) на лінійний ріст надземної частини та ріст і накопичення біомаси коренів проростків довгоденної культури гороху посівного є можливо специфічною реакцією-відповіддю, оскільки літературні дані стосовно дії ЗС на ростову реакцію є досить розбіжними. Так показано, що для проростків дводольних культур *Lactuca sativa* L. та *Brassica oleracea* L. дія зеленого світла гальмує накопичення біомаси, в той же час для однодольних *Avena sativa* L. та *Triticum aestivum* L. — навпаки стимулює цей процес [4].

Морфогенетичний розвиток надземної частини етіюльованих проростків характеризується певними рисами, притаманними дводольним рослинам за реалізації програми скотоморфогенезу. Етіюльовані проростки видовжені, механічні та провідні тканини не сформовані, фотосинтетичний апарат не розвинений, відсутні хлорофіли, невеликий вміст каротиноїдів, пластиди представлені етіопластами, продиhi відсутні [15]. За дії селективного світла, що призводить до активації фоторецепторних систем, можливі зміни програми морфогенетичного розвитку проростка.

За нашими результатами надземна частина етіюльованих проростків довгоденної рослини гороху посівного змінює програму розвитку (з етіюляції на фотоморфогенез) тільки за активації фітохромної системи (табл. 1). Опромінення ЧС (660 нм) призводить до скорочення довжини епікотилу, зменшення кількості міжвузль на проростку, що свідчить про гальмування специфічної форми росту рослинного організму «росту розтягненням», який найбільш характерний для етіюльованого стану проростка [17]. Однією з головних морфогенетичних реакцій, що характеризує програму фотоморфогенезу у дводольних рослин, є розгортання апікального гачка. За опромінення ЧС (660 нм) у дослідних проростків цей показник збільшується вдвічі, що свідчить про початок дії програми фотоморфогенезу. Опромінення ЗС (530 нм) та СС (450 нм) у гороху не призводить до істотних змін у морфогенетичному розвитку надземної частини проростків, що, можливо, пов'язано з відсутністю активованих фоторецепторних систем для сприйняття сигналу селективного світла даного спектру у надземній частині етіюльованих проростків, або незначної їх концентрації для прояву ефекту (або не достатньої інтенсивності світлового сигналу).

Таблиця 1. Вплив селективного світла на морфогенетичний розвиток надземної частини етіюльованих проростків гороху сорту Метсенат ($m \pm \sigma$)

Table 1. The influence of selective light on the morphogenetic development of the aerial part of etiolated pea seedlings of the Metsenat variety ($m \pm \sigma$)

Варіант	Кількість міжвузль, шт./рослина	Кількість розгорнутих апикальних гачків, шт./рослина
Контроль	2,16 ± 0,11	0,31 ± 0,02
ЧС (660 нм)	2,51 ± 0,13*	0,51 ± 0,03*
ЗС (530 нм)	2,23 ± 0,11	0,27 ± 0,01
СС (450 нм)	2,50 ± 0,14*	0,25 ± 0,01

Примітка. * — різниця з контролем істотна при $P \leq 0,017$

Найважливіша функція кореня рослинного організму це забезпечення мінерального живлення в гетерогенному середовищі з нерівномірним розподілом поживних речовин. Необхідність компенсації цієї нерівномірності призводить до розгалуження кореня і формування кореневої системи. Внаслідок розгалуження коренів формується така

будова кореневої системи, яка визначає можливість збільшення площі контакту рослин з субстратом та їх пристосованість до отримання води з субстратів різного типу. Ініціація бічного кореня у насінневих рослин є результатом відновлення проліферації в диференційованих клітинах перициклу, внаслідок якої формується апікальна меристема нового органу.

Коренева система у представників бобових — в наших дослідях гороху посівного сорту Меценат — за типом будови стрижнева, тобто є добре розвинутий головний корінь та бічні корені. Розгалуження кореневої системи — утворення та ріст бічних коренів (ризогенез) — забезпечує повною мірою головні функції кореня, а саме поглинання води та мінеральних речовин та закріплення у субстраті (рис. 2).

Результати дослідження впливу селективного світла на процеси ризогенезу у проростків гороху сорту Меценат показали, що опромінення ЧС та СС істотно не впливало на формування бічних коренів, бо їх кількість у цих варіантах хоча дещо й збільшувалась, але була практично такою ж, як і в контролі.

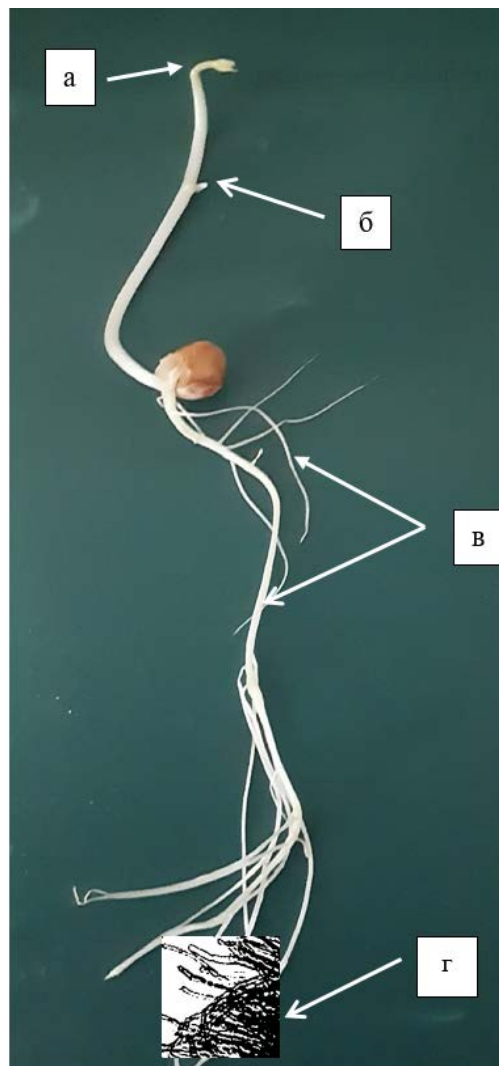


Рис. 2. Етіолований проросток гороху посівного сорту Меценат: а) апікальний гачок, б) міжвузля, в) латеральні (бокові) корені, г) зона ризодерми.

Fig. 2. Etiolated pea seedling of Metsenat variety: a) apical hook b) internodes c) lateral (side) roots d) rhizoderm zone.

Опромінення ЗС стимулювало процес утворення бічних коренів — їх кількість істотно збільшувалась, порівняно до контролю (табл. 2). Лінійний ріст бічних коренів проростка істотно посилювався за впливу ЧС, ЗС і СС — їх довжина була більшою за опромінення відносно довжини у контрольному варіанті. При цьому найбільш істотна стимуляція росту бічних коренів виявлена за опромінення проростків синім світлом (табл. 2).

Волосконосний шар є покривною тканиною кореня в зоні поглинання вище точки росту. Він називається ризодермою, або епіблемою. Клітини цього шару утворюють вирости — кореневі волоски. Дослідження впливу селективного світла на розвиток корневих волосків у проростків гороху сорту Меценат показало (табл. 2), що за опромінення червоним і зеленим світлом зменшувалася площа зони всмоктування (ризодерми). Протилежна реакція встановлена за дії синього світла (450 нм) — площа ризодерми збільшувалася удвічі (табл. 2). Порівняння ефектів опромінення світлом різної довжини хвилі на площу ризодерми показало, що червоне світло значно більшою мірою інгібувало розвиток ризодерми, ніж зелене, а синє, навпаки, у два-три рази сильніше стимулювало цей процес порівняно до ефектів червоного і зеленого світла. Вірогідно, що така залежність ефектів від довжини хвилі може бути пов'язана з різним рівнем вмісту чи активності певних відповідних фоторецепторів у кореневій системі.

Не виключено також, що фотоопосередковані молекулярно-генетичні механізми регуляції формування ризодерми можуть бути специфічними саме для цього процесу, адже відомо, що у регуляції утворення окремих органів задіяні певні специфічні комплекси генів [12, 15].

Отже, за опромінення селективним світлом різного спектру ЧС, ЗС та СС встановлено, що осьові органи проростків реагують різним чином: надземна частина проростка проявляє чутливість тільки до дії ЧС, коренева система реагує на опромінення всіх спектрів. Надземна частина за активації фітохромної системи шляхом опромінення ЧС (660 нм) змінює програму розвитку та запускає процеси деетіоляції. Коренева система за опромінення селективним світлом ЧС (660 нм), ЗС (530 нм) активує процеси ризогенезу — розгалуження та росту бічних (латеральних) коренів, але ріст корневих волосків у ризодермі гальмується. За дії СС (450 нм) відбувається активація росту в довжину латеральних коренів та значна стимуляція збільшення зони ризодерми за рахунок корневих волосків (табл. 2). Відомо, що цей процес обумовлений специфічною формою росту рослинних клітин — ростом «розтягненням» [17].

Таблиця 2. Вплив селективного світла на морфогенетичний розвиток кореневої системи етіюльованих проростків гороху сорту Меценат ($m \pm \sigma$)

Table 2. The effect of selective light on the morphogenetic development of the root system of etiolated pea seedlings of the Metsenat variety ($m \pm \sigma$)

Варіант	Кількість бокових коренів, шт.	Довжина бокових коренів, см	Площа зони ризодерми, мм ²
Контроль	9,47 ± 0,47	2,53 ± 0,13	17,1 ± 0,85
ЧС (660 нм)	10,82 ± 0,54	3,08 ± 0,15*	9,4 ± 0,47*
ЗС (530 нм)	11,34 ± 0,57*	3,20 ± 0,16*	14,3 ± 0,72
СС (450 нм)	9,86 ± 0,48	3,59 ± 0,18*	34,2 ± 1,70*

Примітка. * — різниця з контролем істотна при $P \leq 0,017$

Вуглеводи — це сполуки, які забезпечують перебіг всіх процесів життєдіяльності у рослині речовиною та енергією на всіх етапах онтогенезу [6, 11]. На етапі етіоляції вуглеводи використовуються для забезпечення росту дводольних рослин виключно із запасів у сім'ядолях. В етіюльованих проростках, де живлення здійснюється гетеротрофно, розчинні вуглеводи утворюються за рахунок гідролізу основного запасного полісахариду сім'ядоль — крохмалю. Використання запасних вуглеводів сім'ядоль для формування проростка може підлягати контролю активацією фоторецепторних систем, зокрема фітохромної [1, 15]. Тому, нами проведене вивчення можливого впливу селективного світла на вміст водорозчинних вуглеводів у органах етіюльованих проростків гороху сорту Меценат. Їх вміст визначали у надземній частині і коренях, припускаючи, що ці органи можуть по-різному забезпечуватися вуглеводами, так як вони відрізняються за інтенсивністю ростових процесів, про що свідчать дані, одержані нами у цій роботі (див. табл. 1, 2; рис. 1).

Аналіз вмісту водорозчинних вуглеводів показав, що за цим показником олігоцукри значно переважають моноцукри і в надземній частині, і в коренях етіюльованих проростків гороху посівного (рис. 3 А, Б).

Можливо, що причиною цього є те, що моноцукри значно інтенсивніше використовуються у метаболічних процесах та для забезпечення ростових процесів у проростках, ніж олігоцукри. Це співпадає зі стимуляцією накопичення біомаси надземною частиною проростка за дії ЧС, ЗС та СС (див. рис. 1 А).

В надземній частині проростків вміст моноцукрів, які складають приблизно 30-50 % від вмісту олігоцукрів, істотно збільшувався тільки при опроміненні ЗС порівняно до вмісту у контролі (рис. 3 А). В той же час вміст олігоцукрів значно зростав за дії всіх спектрів селективного світла — ЧС, ЗС та СС (рис. 3 А).

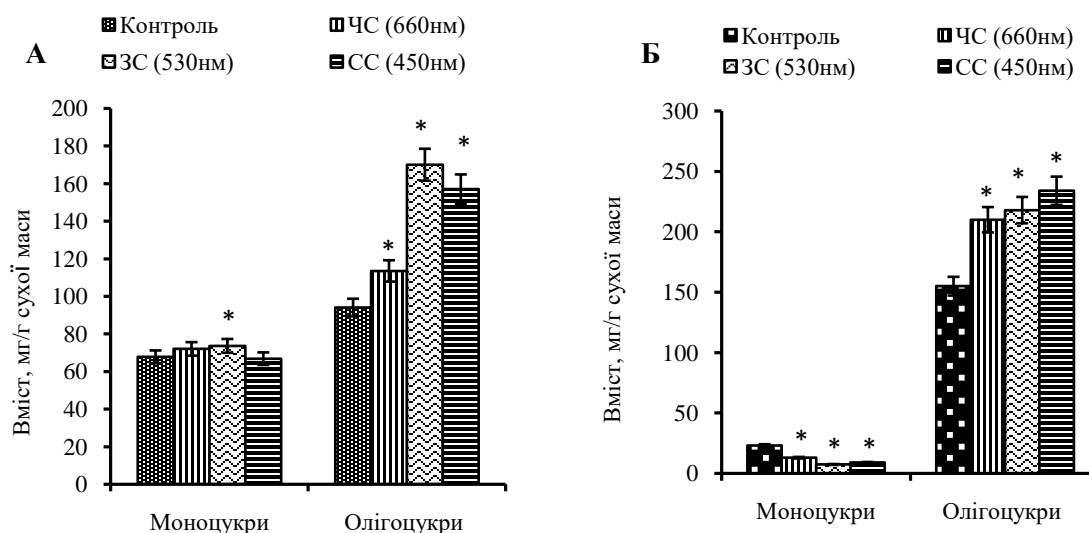


Рис. 3. Вплив селективного світла на вміст водорозчинних вуглеводів в осьових органах етіюльованих проростків гороху сорту Меценат ($m \pm \sigma$): А — вміст у надземній частині, Б — вміст у коренях; * — різниця з контролем істотна при $P \leq 0,017$.

Fig. 3. The effect of selective light on the content of soluble carbohydrates in the axial organs of etiolated pea seedlings of the Metsenat variety ($m \pm \sigma$): A — content in the aerial part, B — content in the roots; * — the difference with the control is significant at $P \leq 0.017$

Тим не менше, при цьому ефекти різних спектрів на вміст олігоцукрів у надземній частині проростка істотно відрізнялися. Найменшим вміст олігоцукрів був за дії

червоного світла, найбільшим за дії зеленого, а за дії синього вміст їх був більшим, ніж за дії червоного і дещо меншим, ніж за дії зеленого світла (рис. 3 А). Регуляторну роль ЗС у вуглеводному метаболізмі за рахунок збільшення долі олигоцукрів показано також на культурі клітин *Chlorella vulgaris* та проростках *Avena sativa* L. [4]. Це може свідчити про те, що активація певних фоторецепторних систем викликає різний рівень інтенсивності метаболічних шляхів синтезу олигоцукрів, зокрема сахарози, котра складає основну частку цих сполук у рослині [18]. Оскільки основним джерелом утворення цукрів у проростках є гідроліз запасного крохмалю сім'ядоль, кінцевий продукт якого D-глюкоза, а не сахароза, то, вірогідно, що зростання вмісту олигоцукрів відбувається за рахунок інтенсифікації їх синтезу *de novo*. Однак це припущення вимагає додаткової експериментальної перевірки.

В кореневій системі проростків моноцукрів значно менше, ніж в надземній частині (рис. 3 Б). Опромінення селективним світлом ЧС, ЗС та СС призводить до значного зниження їх вмісту, порівняно до вмісту у контрольному варіанті. Моноцукри (переважно глюкоза та фруктоза) є дуже активними молекулами, які задіяні в метаболічних реакціях рослинної клітини. Зниження їх вмісту може свідчити про активацію процесів метаболізації цих сполук, пов'язаної з новоутворенням клітин та тканин, тобто ростовими процесами, можливо, з активацією процесів саме ризогенезу. Для коренів етіюльованих проростків гороху, як показали результати цієї роботи, характерний значно більш інтенсивний лінійний ріст, ніж ріст надземної частини (див. рис. 1 А, Б), на забезпечення якого, вірогідно, і використовуються моноцукри.

Олігоцукри у рослині переважно представлені головним транспортним вуглеводом рослин — сахарозою [18]. Однак ця сполука не може безпосередньо використовуватися у метаболічних процесах. За опромінення селективним світлом всіх досліджуваних спектрів — ЧС, ЗС та СС в коренях (рис. 3 Б) також, як і в надземній частині проростків, вірогідно, відбувається стимуляція біосинтезу олигоцукрів, зокрема сахарози *de novo*.

ВИСНОВКИ

1. Активація фоторецепторних систем дією червоного (ЧС 660 нм), зеленого (ЗС 530 нм) і синього (СС 450 нм) світла викликає зміни у інтенсивності ростових і морфогенетичних процесів та обміні водорозчинних вуглеводів у проростках довгоденної рослини гороху посівного сорту Меценат.

2. Під впливом опромінення всіма застосованими у досліді довжинами хвиль маса надземної частини проростків зростала на 26 % (ЧС), 20 % (ЗС) і 21 % (СС). Маса коренів збільшувалась на 12 і 32 % за дії ЧС і ЗС відповідно, але незначно зменшувалась (на 3 %) за дії СС порівняно до маси у контрольному варіанті.

3. Лінійний ріст надземної частини і коренів проростків стимулювався тільки ЗС (більш ніж на 16 %) і неістотно (на 2–8 %) інгібувався ЧС та СС порівняно до росту у контролі.

4. Вміст моноцукрів у надземній частині проростка збільшувався на 14 % за дії ЗС, але зменшувався на 4–5 % за дії ЧС і СС. У коренях вміст моноцукрів істотно зменшувався (на 30–50 %) за всіх варіантів опромінення порівняно зі вмістом у контрольному варіанті.

5. Вміст олигоцукрів у надземній частині і коренях проростків був істотно вищим (на 20–40%), ніж у контрольному варіанті, за опромінення світлом всіх застосованих довжин хвиль.

6. У надземній частині проростка червоне і синє світло обумовило збільшення (на 13%) числа міжвузль і числа розгорнутих апікальних гачків. За дії зеленого світла ці показники були такими ж, як у контролі.

7. У кореневій системі за дії ЗС збільшилась (на 16 %) кількість бічних коренів, а їх довжина зростала у всіх варіантах опромінення (на 20, 21 і 29 % відповідно дії ЧС, ЗС і СС). Площа зони ризодерми під впливом ЧС і ЗС зменшилась на 54 і 16 %, відповідно, але під впливом СС вона збільшилася наполовину у порівнянні з площею у контролі.

ПОДЯКА

Роботу виконано в рамках проекту фундаментального дослідження Міністерства освіти і науки України «Методологія дослідження біологічної природи фотоперіодичної чутливості рослин за використання комплексної системи генетичних, фізіологічних та біохімічних показників», номер держреєстрації 0118U002041.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

Olga Avksentyeva  <https://orcid.org/0000-0002-3274-3410>

Євгенія Батуєва  <https://orcid.org/0000-0003-2532-7141>

REFERENCES

- Kami C, Lorrain S, Hornitschek P, Fankhauser C. Light-regulated plant growth and development. *Curr Top Dev Biol.* 2010;91:29–66. [https://doi.org/10.1016/s0070-2153\(10\)91002-8](https://doi.org/10.1016/s0070-2153(10)91002-8)
- Quail PH. Phytochromes. *Curr Biol.* 2010; 20 (12): 504– 7. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.04.014>
- Voitsekhovskaja O V. Phytochromes and Other (Photo) Receptors of Information in Plants. *Russ J Plant Physiol.* 2019;66(3):163–77. <https://doi.org/10.1134/S1021443719030154>
- Golovatskaya IP, Karnachuk RA. Role of green light in physiological activity of plants. *Russ J Plant Physiol.* 2015;62(6):727–40. <https://doi.org/10.1134/S1021443715060084>
- Franklin KA, Quail PH. Phytochrome function in Arabidopsis development. *J Exp Bot.* 2010;61:11–24. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp304>
- Sakr S, Wang M, Dédaldéchamp F, Perez-Garcia M-D, Ogé L, Hamama L, Atanassova R. The Sugar-Signaling Hub: Overview of Regulators and Interaction with the Hormonal and Metabolic Network. *Int J Mol Sci.* 2018;19(9):2506. <https://doi.org/10.3390/ijms19092506>
- Franklin KA, Whitelam GC. Phytochromes and shade-avoidance responses in plants. *Ann Bot.* 2005;96(2):169–75. <https://doi.org/10.1093/aob/mci165>
- Fujii Y, Tanaka H, Konno N, Ogasawara Y, Hamashima N, Tamura S, Hasegawa S, Hayasaki Y, Okajima K, Kodama Y. Phototropin perceives temperature based on the lifetime of its photoactivated state. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2017;114(34):9206–11. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704462114>
- Canamero CR, Bakrim N, Bouly J-P, Garay A, Dudkin E, Habricot Y, Ahmad M. Cryptochrome photoreceptors cry1 and cry2 antagonistically regulate primary root elongation in Arabidopsis thaliana. *Planta.* 2006;224(5):995–1003. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0280-6>
- Christie JM, Blackwood L, Petersen J, Sullivan S. Plant flavoprotein photoreceptors. *Plant Cell Physiol.* 2015;56(3):401–13. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcu196>
- Eveland A, Jackson D. Sugars, signalling, and plant development. *J Exp Bot.* 2012;63(9):3367–77. <https://doi.org/10.1093/jxb/err379>
- Baier M, Hemman G, Holman R, Corke F, Card R, Smith C, et al. Characterization of mutants in Arabidopsis showing increased sugar-specific gene expression, growth, and developmental responses. *Plant Physiol.* 2004;134(1):81–91. <https://doi.org/10.1104/pp.103.031674>
- Zhmurko V V. [Photoperiodism of plants: physiological, biochemical and genetic aspects]. In: Morgun VV, editor. [Plant physiology: problems and prospects of development]. V. 1. Kyiv: [Logos]; 2009. P. 537–64. (in Ukrainian)
- Ermakov A I, editor. [Methods of biochemical research of plants]. L: Agropromizdat Publ; 1987. 430 p. (in Russian).
- Kuznetsov V V, Doroshenko A S, Kudryakova N V, Danilova M N. Role of Phytohormones and Light in De-etiolation. *Russ J Plant Physiol.* 2020;67:971–84. <https://doi.org/10.1134/S1021443720060102>

16. Kim J Y, Song J T, Seo H S. COP1 regulates plant growth and development in response to light at the post-translational level. *J Exp Bot.* 2017; 68 (17): 4737–48. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx312>
17. Ivanov V B. [Cellular mechanisms of plant growth]. M: Nauka; 2011. 104 p. (in Russian)
18. Koch K. Sucrose metabolism: regulatory mechanisms and pivotal roles in sugar sensing and plant development. *Curr Opin Plant Biol.* 2004;7(3):235–46. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2004.03.014>

PHOTOMORPHOGENESIS AND CONTENT OF CARBOHYDRATES IN THE AXIAL ORGANS OF FIELD PEAN SEEDLINGS UNDER THE INFLUENCE OF SELECTIVE LIGHT

V. V. Zhmurko¹, O. O. Avksentieva¹, Y. D. Batuyeva¹

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine
e-mail: batuyeva96@gmail.com

Submitted July 16, 2021; Revised December 22, 2021;

Accepted February 10, 2022

Background: Light is a multifaceted exogenous factor that plays an important role in plant growth and development. The spectral composition of light is determinative for the regulation of photomorphogenetic processes in plants. Nowadays plants have several groups of photoreceptors that include receptors of red (RL) and far red light (FRL) — phytochromes; receptors of UV-A, blue (BL) and green (GL) light — cryptochromes, phototropins, proteins of the ZEITLUPE family, as well as the UV-B receptor — UVR8 protein. One of the possible mechanisms that realize an activation of photoreceptor systems in the plant may be concerned with carbohydrate metabolism. The research of morphogenetic reactions of seedlings under the action of selective light irradiation by activating photoreceptor systems is important for understanding the mechanisms of regulation of the program of plant organism's ontogenesis.

The aim of this study was to investigate the effect of selective light of different spectrum: RL (660 nm), GL (530 nm) and BL (450 nm) on growth reactions, morphogenesis and content of soluble carbohydrate in axial organs of seedlings of long-day plants.

Materials and methods: 10-day etiolated seedlings of pea Maecenat variety were used for experiments. Activation of photoreceptor systems by red (RL, 660nm), green (GL, 530nm) and blue (BL, 450nm) light was performed for 5 days for 30 minutes using LED matrices. The growth reaction, morphogenesis and the content of soluble mono- and oligosugars in the axial organs of seedlings were analyzed.

Results: The axial organs of seedlings differ in their response to irradiation with selective light. The root system is more sensitive to the action of selective light than the shoot of the seedlings of the long-day plants of the pea Maecenat variety. Activation of photoreceptor systems stimulates growth processes, activates the processes of photomorphogenesis and the biosynthesis of oligosugars *de novo*, most likely sucrose. Among the spectra of selective light, the maximum stimulating effect is shown by irradiation of the GL (530 nm) in the reactions of the aboveground part and roots. RL (660 nm) and BL (450 nm) show opposite effects: RL initiates a photomorphogenetic program of shoot part, and BL has a greater effect on photomorphogenesis of root system.

Conclusions: Different levels of growth, morphogenetic processes and changes in the content of soluble carbohydrates are probably related to the ability of photoreceptor systems to activate the realization of different ways of photomorphogenesis in the axial organs of seedlings under the influence of selective light of a certain spectrum.

KEY WORDS: *Pisum sativum* L.; selective red light (660 nm); green light (530 nm); blue light (450 nm); photomorphogenesis; soluble carbohydrates.

ДІЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-04>

УДК 57.042:577.352

ВПЛИВ ІМПУЛЬСНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НАДНИЗЬКИХ ЧАСТОТ НА H_2O_2 - ТА Fe^{2+} -ІНДУКОВАНЕ ВІЛЬНОРАДИКАЛЬНЕ ОКИСНЕННЯ ЛІПІДІВ В ЛІПОСОМАЛЬНИХ СУСПЕНЗІЯХ**В. С. Мартинюк^{id}, Ю. В. Цейслер^{id}***Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60,
м. Київ, Україна, 01033**e-mail: mavispublisher@gmail.com*

Надійшла до редакції 13 квітня 2022 р. Переглянута 10 червня 2022 р.

Прийнята до друку 15 червня 2022 р.

Актуальність. Тривалий час в експериментальній біології і медицині приділяється особлива увага вільнорадикальним процесам за участю активних форм кисню. В електромагнітній біології інтерес до вільнорадикального окиснення в біологічних мембранах значно підвищився завдяки відкриттю спінових механізмів дії магнітних полів на вільнорадикальні процеси. На даний час саме ці механізми розглядають в якості ключових у процесах магніторецепції в живих організмах. Ліпосоми, як найпростіші моделі біологічних мембран, часто використовують для вивчення первинних механізмів дії факторів різної природи на структурно-функціональні властивості клітинних мембран. Однак вплив магнітних полів наднизьких частот, що мають певне екологічне значення, на вільнорадикальне окиснення в ліпосомальних суспензіях вивчено недостатньо.

Мета роботи: з'ясування особливостей впливу імпульсних магнітних полів (ІМП) наднизьких частот на H_2O_2 - і Fe^{2+} -індуковане перекисне окиснення природних фосфоліпідів у ліпосомальних суспензіях.

Матеріали і методи. В роботі використовували ліпосомальні суспензії у фосфатному буфері рН=7,4. Згідно даним літератури і власних результатів по світлорозсіюванню середній діаметр ліпосом був біля 500 Å. Надслабке світіння ліпосомальних суспензій реєстрували за допомогою приладу, який працював в режимі рахунку окремих квантів світла. Він складався з світлоізолюючого кюветного блоку, де розміщували дослідні зразки, а також датчика температури та соленоїда, за допомогою якого створювали ІМП. Оптичний контакт зразків з фотоелектронним помножувачем здійснювали за допомогою світловоду. Реєструюча система складалася з ширококутового детектору світла — ФЕП-130, який знаходився при температурі -20°C . Для відокремлення корисного сигналу, що відповідав реєстрації окремих квантів світла хемілюмінесценції, використовували аналізатор імпульсів АІ-256. Напруження на ФЕП подавали в діапазоні вольтамперних характеристик ФЕП, в якому випадкові флуктуації напруги мінімально впливали на вимірювання корисного сигналу. Кількість квантів світла, яку реєстрували за певні інтервали часу, характеризувала загальну інтенсивність процесу вільнорадикального окиснення ліпідів у досліджуваних зразках. Імпульсне магнітне поле створювали за допомогою соленоїдної котушки, розташованої в кюветній частині. ІМП створювали за допомогою серійного генератора Г6-28. Імпульси магнітного поля були прямокутної форми зі змінною полярністю за один період коливань. Індукцію ІМП контролювали мікродіагностом Г-79. Вибір серії наднизьких частот

Як цитувати: Мартинюк В.С., Цейслер Ю.В. Вплив імпульсних магнітних полів наднизьких частот на H_2O_2 - та Fe^{2+} -індуковане вільнорадикальне окиснення ліпідів в ліпосомальних суспензіях. Біофізичний вісник. 2022;47:40–50. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-04>

Incites: Martynyuk VS, Tseyslyer YuV. Influence of impulse magnetic fields of extremely low frequencies on H_2O_2 - and Fe^{2+} -induced free radical lipid oxidation in liposomal suspensions. Biophysical Bulletin. 2022;47:40–50. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-04> (in Ukrainian)

Open Access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

(5-80 Гц) і індукції (5–500 мкТл) ІМП був обумовлений їх екологічною і фізіологічною значущістю.

Результати. ІМП різних частот з індукцією 5 і 50 мкТл не впливало ($p > 0,05$) на H_2O_2 - і Fe^{2+} -індуковане окиснення ліпідів в ліпосомальних суспензіях. Статистично значущі зміни ($p < 0,05$) були зареєстровані тільки при експозиції ліпосомальних суспензій у ІМП з індукцією 500 мкТл. Встановлено, що дія ІМП частотою 8 Гц 500 мкТл достовірно пригнічувала H_2O_2 -індукований і підсилювала Fe^{2+} -індукований сплеск хемілюмінесценції. Цей ефект пов'язаний з пригніченням розпаду і накопиченням гідроперекисів фосфоліпідів, які у присутності іонів Fe^{2+} розпадаються і рекомбінують, що супроводжується більш потужною хемілюмінесценцією. Дослідження залежності динаміки інтенсивності хемілюмінесценції від частоти ІМП свідчить про наявність певної залежності ефектів у діапазоні до 30 Гц. При цьому інгібуючий вплив ІМП на H_2O_2 -індуковану фазу окиснення не завжди супроводжується достовірним підвищенням амплітуди Fe^{2+} -залежного спалаху хемілюмінесценції, що свідчить про загальний інгібуючий вплив ІМП на окремих наднизьких частотах.

Висновки. ІМП наднизьких частот достовірно впливає на вільнорадикальне окиснення в ліпосомальних суспензіях тільки при індукціях, які перевищують декілька сотень мікротесла. Це вказує на те, що в умовах вибраної мембранної моделі вплив ІМП на вільнорадикальні процеси реалізується переважно через спінові взаємодії, які визначають рекомбінацію вільних радикалів. Зниження індукції на один-два порядки, а також збільшення частоти ІМП вище 50 Гц призводить до зниження ефективності впливу цього фізичного фактору на інтенсивність вільнорадикального окиснення ліпідів в ліпосомальних суспензіях. Найбільш чутливою ланкою до впливу ІМП є H_2O_2 -індуковане вільнорадикальне окиснення ліпідів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вільнорадикальне окиснення ліпідів; імпульсне магнітне поле; хемілюмінесценція; фосфоліпіди; ліпосомальні суспензії.

Тривалий час в експериментальній біології і медицині приділяється особлива увага вільнорадикальним процесам за участю активних форм кисню [1–3]. До активних форм кисню відносять $OH\cdot$, $O_2\cdot^-$, $HO_2\cdot$, H_2O_2 і O_2^* (синглетний кисень). У переважній більшості робіт вказується на пошкоджуючу дію кисневих радикалів на біологічні структури. Однією з головних мішеней активних форм кисню є ліпіди біологічних мембран. Їх вільнорадикальне окиснення призводить до утворення перекисних продуктів, що суттєво змінює властивості біологічних мембран і порушує їх бар'єрні функції. Давно добре відомо, що активація вільнорадикальних процесів за участю активних форм кисню відбувається при різних патологічних станах і насамперед при різного роду запальних процесах [3–5]. Однак окремі дослідники відмічають позитивний вплив кисневих радикалів, які використовуються клітинними системами для різних задач, зокрема для енергетичних [6].

Чисельні дослідження довели, що вільнорадикальне окиснення ліпідів супроводжується надто слабким світінням. Його походження пов'язано із рекомбінацією перекисних радикалів, утворенням проміжних продуктів у електронно-збудженому стані. Перехід в основний, не збуджений, стан супроводжується випромінюванням квантів світла. Перекисне окиснення ліпідів в живих системах відбувається постійно і тому ще у 60-х роках минулого століття Тарусов Б. Н. запропонував використовувати інтенсивність надто слабого випромінювання біологічних тканин у якості одного з показників гомеостазу [7]. На цей час найбільш дослідженими є механізми надслабкого світіння при перекисному окисненні ліпідів в біологічних мембранах [1, 8, 9]. Дослідження кінетики вільнорадикальних процесів показало, що інтенсивність хемілюмінесценції можна використовувати у якості інтегрального показника, який характеризує швидкість реакцій даного типу як у розчинах, так і у біологічних тканинах [8, 9, 19].

В електромагнітній біології інтерес до вільнорадикальних процесів в біологічних мембранах значно підвищився завдяки відкриттю спінових механізмів впливу постійних магнітних полів на рекомбінацію вільних радикалів [10, 11]. На цей час саме

ці механізми розглядають в якості ключових в процесах магніторецепції у різних тварин [12, 13].

Ліпосоми, як найпростіші модельні системи біологічних мембран, часто використовують для дослідження первинних механізмів дії факторів різної природи на структурно-функціональні властивості клітинних мембран. Дослідження показали, що постійні магнітні поля впливають на окиснення ліпосомальних суспензій [14]. В інших дослідженнях встановлено зміни властивостей біліпідного шару ліпосомальних мембран під впливом електромагнітних полів [15, 16]. Однак вплив магнітних полів низьких і наднизьких частот на вільнорадикальне окиснення в ліпосомальних суспензіях хемілюмінесцентним методом вивчено недостатньо.

У зв'язку з цим метою дослідження було з'ясувати особливості впливу імпульсних магнітних полів (ІМП) наднизьких частот на H_2O_2 - і Fe^{2+} -індуковане перекисне окиснення природних фосfolіпідів у ліпосомальних суспензіях.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Ліпосомальні суспензії формували з фосfolіпідів яєчного жовтка, які отримували згідно [17]. Ліпосоми отримували авторським інжекційним методом, принцип якого було взято в [18]. Спиртові розчини фосfolіпідів готували у концентрації 10^{-2} М. Вказані розчини об'ємом 0,3 мл за допомогою інсулінового шприцу на 1 мл з внутрішнім діаметром голки 0,15 мм зі швидкістю 0,15 мл/с вносили у 29,7 мл 0,1 М фосфатного буфера рН=7,4 й одразу перемішували протягом 2 сек. Відповідно до результатів наших власних вимірювань методом спектру мутності [26] за таких умов формуються ліпосоми сферичної форми з середнім діаметром приблизно 500 Å.

Надслабке світіння реєстрували за допомогою реєструючої системи (рис. 1), що побудована за блоковим принципом із серійних реєструючих приладів, яка працювала в режимі рахунку окремих квантів світла. Система мала світлоізолюючий кюветний блок, де розміщували зразки, що досліджувались, а також датчик температури і соленоїд, за допомогою якого утворювали ІМП. Температура всередині даного блоку підтримувалась системою на основі водного термостату.

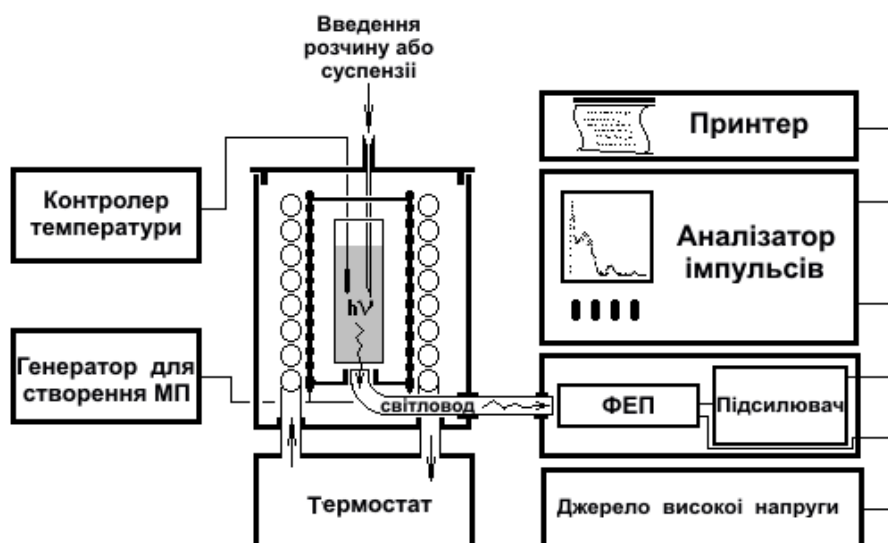


Рис. 1. Схема приладу для реєстрації хемілюмінесценції в режимі рахунку квантів.

Fig. 1. Scheme of the device for registration of chemiluminescence in the mode of quantum counting.

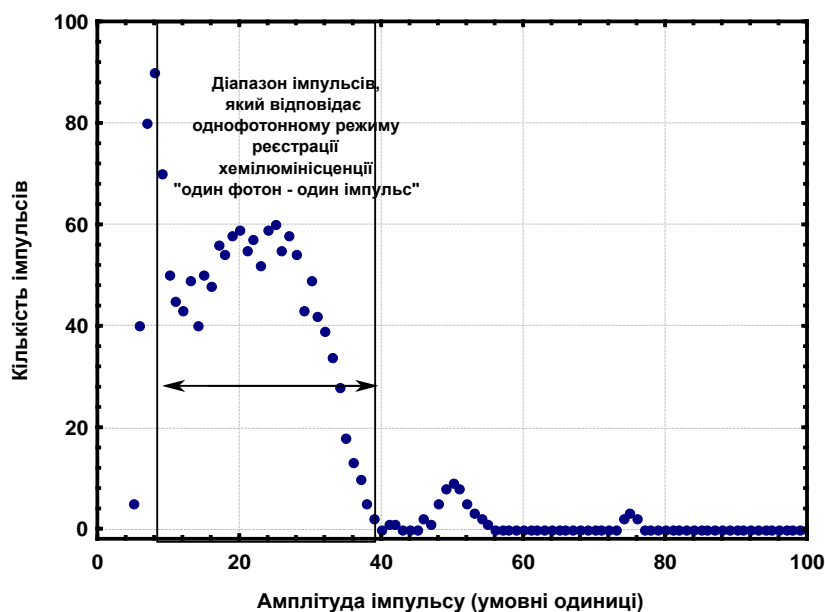


Рис. 2. Амплітудний розподіл імпульсів, які надходять з ФЕП на вхід аналізатора імпульсів. Стрілками показано робочий діапазон імпульсів, який відповідає хемілюмінесцентному сигналу в режимі «один фотон — один імпульс».

Fig. 2. Amplitude distribution of pulses coming from the photoelectronic amplifier to the input of the impulse analyzer. The arrows show the operating range of impulses, which corresponds to the chemiluminescent signal in the mode "one photon — one impulse".

Оптичний контакт зразків, що досліджували, з фотоелектронним помножувачем здійснювали за допомогою світловоду. Реєструюча система складалася з ширококутового детектора світла — ФЕП-130, який знаходився при температурі — 20°C. Імпульсні сигнали, які виникали внаслідок взаємодії фотонів світла з фоточутливим шаром ФЕП, надходили на узгоджуючий підсилювач і далі — в аналізатор імпульсів АІ-256, за допомогою якого отримували розподіл імпульсів за різними каналами залежно від їх амплітуди. Це дозволило відокремити корисний сигнал, який відповідав реєстрації окремих квантів хемілюмінесценції на фоні імпульсного шуму посилювача і ФЕП (рис. 2). Час накопичення імпульсів встановлювали експериментально залежно, з одного боку, від природи і концентрації речовин, які вступали в реакцію, а з іншого — від експериментальних умов і вимог, які забезпечували адекватну реєстрацію часової динаміки досліджуваних процесів.

Напруження на ФЕП подавали з таким розрахунком, щоб воно відповідало діапазону вольтамперних характеристик ФЕП, в якому випадкові флуктуації напруги мінімально впливали на вимірювання корисного сигналу.

Дані про кількість імпульсів у кожному каналі аналізатора у виділеному діапазоні виводились на спеціальний принтер і сумувались. Таким чином отримували інформацію про кількість квантів світла, які потрапляли у світловод, — світлосуму, яка у свою чергу характеризувала загальну інтенсивність процесу вільнорадикального окиснення ліпідів у дослідних зразках.

Імпульсне магнітне поле створювали за допомогою соленоїдної котушки, розташованої в кюветному блоці (рис. 1), та серійного генератора Г6-28, який дозволяє створювати магнітні поля встановлених частот і амплітуд. Імпульси МП були прямокутної форми зі змінною полярністю за один період коливань. Індукцію ІМП контролювали мікротесламетром Г-79.

Вибір серії наднизьких частот (5–80 Гц) та індукції (5–500 мкТл) ІМП був обумовлений їх екологічною і фізіологічною значущістю. Зокрема, на цей час Всесвітня організація охорони здоров'я і наукова громадськість акцентують увагу на тому факті, що електромагнітні поля наднизьких частот є одним з факторів забруднення навколишнього середовища, який може впливати на здоров'я людини [22, 23]. Водночас з цим, електромагнітні поля наднизьких частот, як біологічно активний фізичний фактор, використовують в медицині, особливо для купування болі, прискорення загоєння тканин, тощо [24, 25].

Протокол дослідження дозволяв отримувати достатні для отримання нормального розподілу статистичних вибірок отриманих даних. Тому статистичну обробку проводили за допомогою параметричних статистичних методів. В якості критерію достовірності різниць між показниками використовували t-критерій Ст'юдента.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження динаміки інтенсивності хемілюмінесценції показало, що додавання перекису водню у ліпосомальні суспензії викликало спалах світіння, який спадав протягом перших хвилин, після чого світіння суспензій виходило на новий стаціонарний рівень, який перевищував початковий фоновий рівень приблизно у 1,5 рази (рис. 3). Це вказує на те, що внесення 3% розчину H_2O_2 у ліпосомальні суспензії у співвідношенні 1:10 активує вільнорадикальне окиснення ліпідів, після чого процес виходить на відносно стаціонарний рівень. Така поведінка є типовою для систем, що моделюють вільнорадикальне окиснення в біологічних зразках [1, 19]. Внесення в систему іонів заліза Fe^{2+} у вигляді розчину сульфату заліза в кінцевій концентрації 10^{-4} М, що є потужним каталізатором перекисного окиснення ліпідів [1, 19], призводило до ще більш сильної активації вільнорадикального окиснення фосфоліпідів і виходу системи на більш високий рівень світіння (рис. 3).

З самого початку важливо відмітити, що ІМП різних частот з індукцією 5 і 50 мкТл не впливало ($p > 0,05$) на H_2O_2 - і Fe^{2+} -індуковане окиснення ліпідів в ліпосомальних суспензіях. Статистично значущі зміни ($p < 0,05$) були зареєстровані тільки при експозиції ліпосомальних суспензій у ІМП з індукцією 500 мкТл (рис. 3). Тому у подальшому мова буде йти тільки про результати дослідження із впливом ІМП з цими параметрами.

Встановлено, що дія ІМП частотою 8 Гц достовірно пригнічувала H_2O_2 -індукований і підсилювала Fe^{2+} -індукований сплеск хемілюмінесценції (рис. 3). При цьому стаціонарні рівні світіння мало відрізнялися один від одного. Така різниця окислювальної системи на вплив ІМП потребувала подальшого уточнення магніточутливих ланок перекисного окиснення ліпідів. Тому було проведено вивчення диференційного впливу ІМП, тобто або під час розвитку H_2O_2 -індукованого окиснення, або при внесенні іонів заліза, які ініціювали розпад перекису водню і органічних пероксидів.

Як показали результати досліджень, магніточутливою ланкою переважно є стадія H_2O_2 -індукованого окиснення (рис. 4). Тобто, якщо проводити вільнорадикальне окиснення перексидом водню без впливу ІМП, то при впливі цього фізичного фактору тільки на Fe^{2+} -індуковану стадію окиснення достовірних змін інтенсивності хемілюмінесценції не відбувається (рис. 4). Даний факт можна пояснити таким чином, що при H_2O_2 -індукованому окисненні вплив ІМП частотою 8 Гц пригнічує розпад і стимулює накопичення гідропероксидів фосфоліпідів, які при додаванні іонів Fe^{2+} піддаються подальшому окисненню, що супроводжується більш потужним випромінюванням квантів світла.

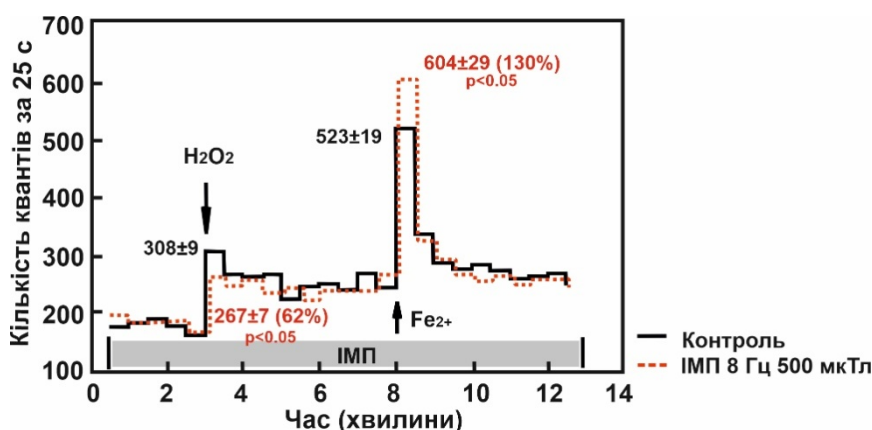


Рис. 3. Динаміка H_2O_2 - і Fe^{2+} -індукованої хемілюмінесценції ліпосомальних суспензій в контрольних умовах (суцільна лінія) і у режимі безперервного впливу ІМП 8 Гц 500 мкТл (штрих-лінія).

Примітки: цифрами біля ліній вказано середні значення та похибки середньої кількості квантів світла за час спалаху за 25 секунд, у скобках — величина сигналу відносно контрольних значень.

Fig. 3. Dynamics of H_2O_2 - and Fe^{2+} -induced chemiluminescence in liposomal suspensions for control conditions (solid line) and for the mode of continuous exposure to PMF 8 Hz 500 μT (dash line).

Notes: The numbers next to the lines indicate the mean values and mean errors of number of light quanta during the flash in 25 seconds, in parentheses — the value of the signal in % relative to the control values.

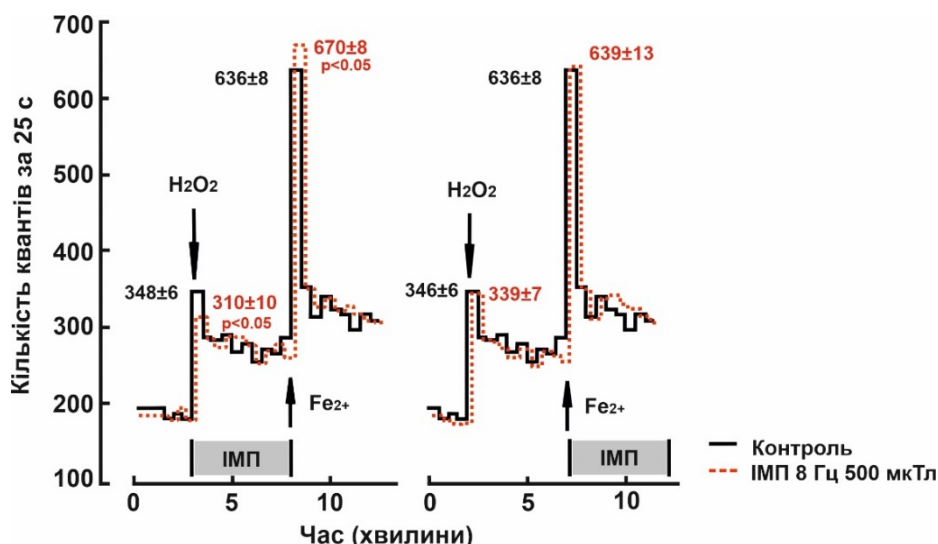


Рис. 4. Динаміка H_2O_2 - і Fe^{2+} -індукованої хемілюмінесценції ліпосомальних суспензій в контрольних умовах (суцільна лінія) та у режимі диференційованого впливу ІМП 8 Гц 500 мкТл (штрих-лінія).

Примітки: цифрами біля ліній вказано середні значення та похибки середньої кількості квантів світла за час спалаху 5 секунд, діапазони впливу ІМП позначені стрілками вздовж осі часу.

Fig. 4. Dynamics of H_2O_2 - and Fe^{2+} -induced chemiluminescence of liposomal suspensions for control conditions (solid line) and for the mode of differentiated influence of PMF 8 Hz 500 μT (dash line).

Notes: The numbers next to the lines indicate the mean values and mean errors of number of light quanta during the flash in 5 seconds, the ranges of the PMF are indicated by arrows along the time axis.

Аналіз отриманих результатів в контексті сучасних уявлень про механізми дії магнітних полів на вільнорадикальні процеси дозволяють зробити припущення про первинні механізми дії ІМП для даної моделі перекисного окиснення. ІМП наднизьких частот можна розглядати як квазістатичне, тому що тривалість магнітних імпульсів на багато порядків перевищує час життя радикальних пар у комірках розчинника. Таким чином, вплив ІМП може здійснюватися за механізмом спінової заборони [10, 11]. Даний механізм базується на тому, що МП по різному змінює частоту прецесії спінів окремих радикалів у радикальній парі, що змінює вірогідність їх рекомбінації. Це призводить до змін утворення тих чи інших продуктів реакції. Для ліпосомальної моделі можна припустити, що ІМП наднизьких частот сприяє рекомбінації ліпідних радикалів $\text{R}\cdot$ з радикалами $\text{HOO}\cdot$, що призводить до зростання концентрації і накопичення гідропероксидів ROOH , розпад яких каталізують іони Fe^{2+} . При цьому, на рекомбінацію таких радикалів, як $\text{RO}\cdot$, які у більшій кількості утворюються при Fe^{2+} -індукованому окисненні, ІМП, ймовірно, суттєво не впливає.

Однак, може бути й інше пояснення. Зокрема, якщо ІМП підвищує вірогідність рекомбінації $\text{HO}\cdot$ -радикалів, що утворюються при розпаді перекису водню, то це буде еквівалентним зниженню витрат перекису водню, який є необхідним для ініціації вільнорадикального окиснення та його збереження у молекулярній формі. Тому зниження інтенсивності хемілюмінесценції у фазі H_2O_2 -індукованого окиснення може бути наслідком такого інгібуючого («антиоксидантного») впливу ІМП. Внесення іонів заліза в розчин буде призводити до розпаду не тільки органічних пероксидів, але й перекису водню, який не прореагував, що у свою чергу забезпечить більш інтенсивне вільнорадикальне окиснення і, як наслідок, — підвищення інтенсивності спалаху хемілюмінесценції.

Логічно припустити, що вказані шляхи впливу ІМП на перекисне окиснення ліпідів реалізуються одночасно.

Якщо такі пояснення є правильними, то величина інгібуючого ефекту повинна сильно залежати від індукції ІМП, але мало залежати від частоти у діапазоні наднизьких частот. Як було вказано вище, в експериментах з низькою індукцією ІМП ефекти дії цього фактору були практично відсутні. Аналіз літературних даних показує, що помітний і статистично значущий вплив МП на вільнорадикальні хімічні реакції починається з індукції МП 100–200 мкТл [11, 14], що також спостерігалось у наших експериментах. Таким чином, встановлені факти впливу ІМП індукцією 500 мкТл на вільнорадикальне окиснення фосfolіпідів, здається, цілком можна пояснити у рамках вищенаведених теоретичних поглядів.

Тим не менш, дослідження частотної залежності окремих характеристик динаміки інтенсивності люмінесценції показує наявність певної залежності ефектів у діапазоні до 30 Гц (рис. 5). При цьому інгібуючий вплив ІМП на H_2O_2 -індуковану фазу окиснення не завжди супроводжується достовірним підвищенням амплітуди Fe^{2+} -залежного спалаху хемілюмінесценції. Показник світлосуми також демонструє інгібуючий ефект на стадії H_2O_2 -ініційованого окиснення фосfolіпідів у смузї частот до 10 Гц. Однак на частоті 20 Гц інгібуючий вплив МП спостерігається для обох варіантів окиснення, тобто для H_2O_2 - і Fe^{2+} -індукованого окиснення (рис. 5).

Слід відмітити, що наявність певної частотної залежності вказує на те, що в основі первинних механізмів впливу можуть лежати різні фізичні явища. Добре відомо, що магнітні поля змінюють швидкість рекомбінації вільних радикалів [10, 11]. Діючи на радикальні пари магнітне поле може ініціювати або гальмувати їх синглет-триплетну конверсію і, як наслідок, впливати на їх рекомбінацію і, відповідно, на швидкість утворення продуктів вільнорадикального процесу.

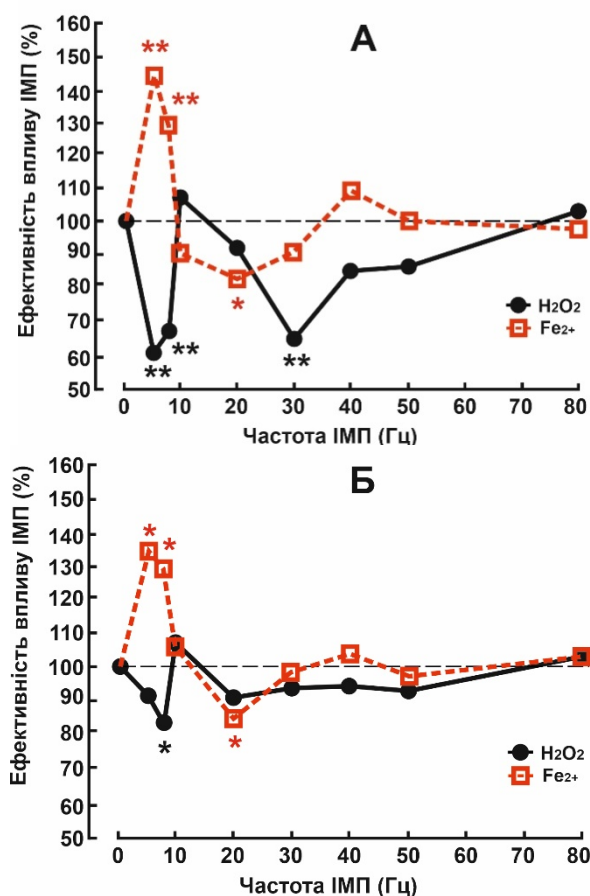


Рис. 5. Частотна залежність впливу ІМП 8 Гц індукцією 500 мкТл відносно контрольних значень на амплітуду спалаху (А) і світлосуму (сумарна кількість квантів за 5 хв. з моменту розвитку спалаху) (Б) H₂O₂- і Fe²⁺-індукованої хемілюмінесценції. За 100% прийнято контрольні значення.

Примітки: * — p<0.05, ** — p<0.01.

Fig. 5. Frequency dependence of the effect of PMF 8 Hz 500 μ T (in % relative to control values) on the amplitude of the flash (A) and light sum (total number of quanta in 5 minutes after the flash start) (B) for H₂O₂- and Fe²⁺-induced chemiluminescence. Control values were taken as 100%.

Notes: * — p < 0.05, ** — p < 0.01.

Швидкість синглет-триплетної конверсії тим вище, чим більше різниця g-факторів для пари вільних радикалів і вище напруженість магнітного поля. У випадку нашого експерименту імпульсне магнітне поле, що змінювалось за напрямом у діапазоні наднизьких частот, для реалізації даного механізму можна розглядати як квазістатичне. Саме тому при низькому напруженні магнітного поля у діапазоні 5–50 мкТл ми не спостерігали достовірних ефектів його впливу на вільнорадикальне окиснення ліпідів в ліпосомах. Питання щодо механізмів частотної залежності впливу магнітного поля індукцією 500 мкТл залишається дискусійним і, можливо, пов'язано з іншими первинними механізмами впливу. Серед таких кандидатів на цю роль можуть бути також фізичні явища, які пов'язані зі змінами властивостей водної фази і зсуву гідрофільно-гідрофобного балансу, що зрештою проявляється у змінах поверхнево-активних властивостей фосfolіпідів, а також гідрофільності/гідрофобності поверхні та інших фізичних властивостей мембран [20, 21], що у свою чергу повинно впливати на кінетику вільнорадикальних процесів в біліпідному шарі мембран.

ВИСНОВКИ

Таким чином, ІМП наднизьких частот достовірно пригнічує вільнорадикальне окиснення в ліпосомальних суспензіях тільки при індукціях, які перевищують декілька сотень мікروتесла. Це вказує на те, що в умовах вибраної мембранної моделі вплив ІМП на вільнорадикальні процеси реалізується переважно через спінові взаємодії, що визначають рекомбінацію вільних радикалів. Зниження індукції на один-два порядки, а також збільшення частоти ІМП вище 40–50 Гц, призводить до суттєвого зниження ефективності впливу цього фізичного фактору на інтенсивність вільнорадикального окиснення ліпідів у ліпосомальних суспензіях. Найбільш чутливою ланкою до впливу ІМП є H_2O_2 -індуковане вільнорадикальне окиснення ліпідів.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

V. S. Martynyuk  <https://orcid.org/0000-0002-5311-3565>

Yu. V. Tseyslyer  <https://orcid.org/0000-0001-7689-9620>

REFERENCES

1. Vladimirov YA, Archakov AI. Perekisnoe okislenie lipidov v biologicheskikh membranah [Lipid peroxidation in biological membranes]. Moscow: Nauka; 1972. 250 p. (in Russian)
2. Dickinson BC, Chang CJ. Chemistry and biology of reactive oxygen species in signaling or stress responses. *Nat Chem Biol.* 2011;7(8):504–11. <https://doi.org/10.1038/nchembio.607>
3. Checa J, Aran JM. Reactive Oxygen Species: Drivers of Physiological and Pathological Processes. *J Inflamm Res.* 2020;13:1057–73. <https://doi.org/10.2147/JIR.S275595>
4. Lipid Peroxides in Biology and Medicine. Kunio Yagi, editor. Academic Press; 1982. 364 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-768050-7.X5001-X>
5. Yoshida Y, Umeno A, Shichiri M. Lipid peroxidation biomarkers for evaluating oxidative stress and assessing antioxidant capacity *in vivo*. *J Clin Biochem Nutr.* 2013;52(1):9–16. <https://doi.org/10.3164/jcfn.12-112>
6. Voeikov VL. Fundamental role of water in bioenergetics. In: Belousov LV, Voeikov VL, Martynyuk VS, editors. *Biophotonic and Coherent Systems in Biology*. NY: Springer; 2007. p. 89–104. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-28417-0>
7. Tarusov BN, Ivanov II, Petrushevich YuM. Sverhslaboe svechenie biologicheskikh system [Extremely low luminescence of biological systems]. Moscow: MGU; 1967. 69 p. (in Russian)
8. Vasil'ev RF. Hemiluminescenciya rastvorov [The chemiluminescence of solutions]. *Uspekhi fizicheskikh nauk [Successes of Physical Sciences]*. 1966;89(34):409–36. (in Russian)
9. Zhuravlev AI. Spontannaya biohemiluminescenciya zhivotnykh tkanej [Spontaneous biochemiluminescence of animal tissues]. In: *Biochemiluminescence*. Moscow: Nauka; 1983. p. 3–30. (in Russian)
10. Buchachenko AL, Sagdeev RZ, Salikhov KM. Magnitnye i spinovye efekty v biologicheskikh sistemah [Magnetic and spin effects in biological systems]. Novosibirsk: Nauka; 1978. 294 p. (in Russian)
11. Sagdeev RZ, Salikhov RV, Molin YuN. Vliyanie magnitnogo polya na processy s uchastiem radikalov i tripletnykh molekul v rastvorah [Influence of magnetic field on processes with radicals and triplet molecules in solutions]. *Uspekhi himii [Advances in chemistry]*. 1977;46(4):569–601. (in Russian)
12. Rodgers CT, Hore PJ. Chemical magnetoreception in birds: The radical pair mechanism. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2009;106(2):353–60. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711968106>
13. Wong SY, Wei Y, Mouritsen H, Solov'yov IA, Hore PJ. Cryptochrome magnetoreception: four tryptophans could be better than three. *J R Soc Interface.* 2021;18:20210601. <https://doi.org/10.1098/rsif.2021.0601>
14. Aristarkhov VM, Klimenko LL, Deev AI, Ivanekha VV. Vliyanie postoyannogo magnitnogo polya na processy perekisnogo okisleniya lipidov v membranah [Influence of static magnetic field on processes of lipid peroxidation in membranes]. *Biofizika [Biophysics]*. 1983;28(5):800–6. (in Russian)
15. Ramundo-Orlando A, Mattia F, Palombo A, D'Inzeo G. Effect of low frequency, low amplitude magnetic fields on the permeability of cationic liposomes entrapping carbonic anhydrase: II. No evidence for surface enzyme involvement. *Bioelectromagnetics.* 2000;21(7):499–507. [https://doi.org/10.1002/1521-186X\(200010\)21:7<499::AID-BEM3>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1521-186X(200010)21:7<499::AID-BEM3>3.0.CO;2-9)
16. Rosen AD. Mechanism of action of moderate-intensity static magnetic fields on biological systems. *Cell Biochem Biophys.* 2003;39:163–73. <https://doi.org/10.1385/CBB:39:2:163>

17. Kucherenko NE, Vasil'ev AN. Lipidy [Lipids]. Kyev: Vysshaya Shkola; 1985. 248 p. (in Russian)
18. Patil YP, Jadhav S. Novel methods for liposome preparation. *Chem Phys Lipids*. 2014;177:8–18. <https://doi.org/10.1016/j.chemphyslip.2013.10.011>
19. Tang L, Zhang Y, Qian Z, Shen X. The mechanism of Fe²⁺-initiated lipid peroxidation in liposomes: the dual function of ferrous ions, the roles of the pre-existing lipid peroxides and the lipid peroxy radical. *Biochem J*. 2000;352(1):27–36. <https://doi.org/10.1042/bj3520027>
20. Marron MT, Goodman EM, Sharpe PT, Greenebaum B. Low frequency electric and magnetic fields have different effects on the cell surface. *FEBS Letters*. 1988;230(1–2):13–6. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(88\)80631-8](https://doi.org/10.1016/0014-5793(88)80631-8)
21. Martynyuk VS, Panov DA Surfactant Properties of Natural Phospholipids in Media Treated with Extremely Low Frequency Magnetic Field. *Biophysics*. 2004;49(1):23–5.
22. Extremely low frequency fields. Geneva: World Health Organization; 2007. 519 p. Available from: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241572385>
23. Valberg PA. Magnetic Fields: Possible Environmental Health Effects. *Encyclopedia of Environmental Health*. 2011;545–57. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00207-5>
24. Markov MS. Magnetic Field Therapy: A Review. *Electromagn Biol Med*. 2007 Jan;26(1):1–23. <http://doi.org/10.1080/15368370600925342>
25. Paolucci T, Pezzi L, Centra AM, Giannandrea N, Bellomo RG, Saggini R. Electromagnetic Field Therapy: A Rehabilitative Perspective in the Management of Musculoskeletal Pain – A Systematic Review. *J Pain Res*. 2020;13:1385–400. <http://doi.org/10.2147/JPR.S231778>
26. Bezrukova AG, Rozenberg OA. Determination of the parameters of liposomes by the turbidity spectrum method. *Bull Exp Biol Med*. 1981;91(4):553–5. <https://doi.org/10.1007/BF00836392>

INFLUENCE OF IMPULSE MAGNETIC FIELDS OF EXTREMELY LOW FREQUENCIES ON H₂O₂- AND Fe²⁺-INDUCED FREE RADICAL LIPID OXIDATION IN LIPOSOMAL SUSPENSIONS

V. S. Martynyuk^{ID}, Yu. V. Tseyslyer^{ID}

Taras Shevchenko National University of Kyiv, 60 Volodymyrska Str., Kyiv, 01033, Ukraine

e-mail: mavispublisher@gmail.com

Submitted April 13, 2022; Revised June 10, 2022;

Accepted June 15, 2022

Background: For a long time, special attention in experimental biology and medicine is paid to free radical processes involving reactive oxygen species. In electromagnetic biology, the interest in free radical oxidation in biological membranes has increased significantly due to the discovery of spin mechanisms of magnetic fields on free radical processes. In the present day, these mechanisms are considered to be key in the processes of magnetoreception in living organisms. Liposomes, as the simplest models of biological membranes, are often used to study the primary mechanisms of action of different factors on the structural and functional properties of membranes. However, the influence of ecological significant extremely low-frequency magnetic fields on free radical oxidation in liposomal suspensions has not been studied enough.

Objectives: The elucidation of the peculiarities of the influence of the extremely low frequency pulsed magnetic fields (ELF PMF) on H₂O₂- and Fe²⁺-induced peroxidation of natural phospholipids in liposomal suspensions.

Materials and methods: The liposomal suspensions in phosphate buffer pH=7.4 were used. According to the literature and own results on light scattering the average diameter of liposomes was about 500 Å. Ultra-weak chemiluminescence of liposomal suspensions was recorded using a device that operated in the mode of single photons counting. It consisted of a light-insulated cuvette unit where the test samples were placed, as well as a temperature sensor and a solenoid, which was used to create the PMF. Optical contact of the test samples with the photoelectron multiplier was carried out using a light guide. The recording system consisted of a broadband photomultiplier tube detector — FEU-130, which was at a temperature of –20°C. The pulse analyzer AI-256 was used to separate the useful signal that corresponded to the registration of single chemiluminescence light quanta. The voltage on the photomultiplier tube detector was applied in the range of current-voltage characteristics of this detector, in which a random voltage fluctuation had a minimal effect on the measurement of the useful signal. The number of light quanta that were recorded for defined time intervals characterized the overall intensity of the process of free radical oxidation of lipids in the experimental samples. The pulsed magnetic field was created using a solenoid coil located in the cuvette part. PMF was created using a serial generator G6-28. The magnetic field pulses were rectangular in shape with variable polarity for a period of oscillations. The induction of PMF

was monitored using microteslameter G-79. The series of extremely low frequencies (5–80 Hz) and induction (5–500 μT) of PMF was chosen due to their environmental and physiological significance.

Results: PMF of different frequencies with induction of 5 and 50 μT did not affect ($p > 0.05$) H_2O_2 - and Fe^{2+} -induced lipid oxidation in liposomal suspensions. Statistically significant changes ($p < 0.05$) were revealed only when liposomal suspensions were exposed to PMF with induction of 500 μT . It was found that the action of PMF with the frequency of 8 Hz 500 μT significantly inhibited H_2O_2 -induced and enhanced Fe^{2+} -induced chemiluminescence. This effect is associated with inhibition of the decomposition and with the accumulation of phospholipid hydroperoxides, which decompose and recombine in the presence of Fe^{2+} ions, which is accompanied by stronger chemiluminescence. The study of the dependence of the dynamics of the chemiluminescence intensity on the frequency of the PMF indicates the presence of a certain dependence of the effects in the range of up to 30 Hz. However, the inhibitory effect of PMF for the H_2O_2 -induced oxidation phase is not always accompanied by a statistically significant increase in the amplitude of Fe^{2+} -dependent light flash of chemiluminescence that indicates the general inhibitory effect of PMF at a certain frequency.

Conclusions: PMF of extremely low frequencies statistically significantly affects the free radical oxidation in liposomal suspensions only at inductions exceeding several hundred microteslas. This indicates the effect of PMF on free radical processes for the conditions of the selected membrane model is realized mainly through spin interactions that determine the recombination of free radicals. The decrease of induction by one or two orders of magnitude, as well as increasing in frequency of the PMF above 50 Hz, leads to a decrease in the effectiveness of the influence of this physical factor on the intensity of lipid-free radical oxidation in liposomal suspensions. The most sensitive to the influence of ELF PMF is the phase of H_2O_2 -induced free radical oxidation of lipids.

KEY WORDS: lipid free radical oxidation; extremely low frequency pulsed magnetic field; chemiluminescence; phospholipids; liposomal suspensions.

<https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-05>

XIV МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ ПО БІОНІЦІ І ПРИКЛАДНІЙ БІОФІЗИЦІ

Чергова XIV Міжнародна конференція по біоніці і прикладній біофізиці відбулася 14-15 жовтня 2021 р. у м. Києві на базі факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Через карантинні обмеження всі заходи конференції відбувалися в дистанційному форматі.

З вітальним словом перед учасниками конференції виступили декан факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук, доцент **Нетреба Андрій В'ячеславович** та директор Інституту прикладних проблем фізики і біофізики НАН України, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, **Мамілов Сергій Олександрович**.

В програму конференції увійшли двадцять сім доповідей. Дуже показово, що більшість робіт зроблені в кооперації декількох наукових установ. Авторами наукових робіт виступили 54 науковця, які представляли Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Інститут прикладних проблем фізики і біофізики НАН України, Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій і систем НАН України та МОН України, Інститут фізики НАН України, Інститут магнетизму НАН України та МОН України, Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України, Інститут мікробіології та вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України, Інститут біохімії ім. О. В. Палладіна, Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України, Донецький національний університет імені Василя Стуса, Київський медичний університет, Навчально-науковий центр «Фізико-хімічне матеріалознавство» НАН України, University of Texas McGovern Medical School (США).

Щиро сподіваємося на зустріч на XV Міжнародній конференції по біоніці і прикладній біофізиці.

С. О. Мамілов

*Інститут магнетизму НАН України та МОН України, бульв. Акад. Вернадського 36-б,
Київ, Україна, 03142*

*До 2022 р — Інститут прикладних проблем фізики і біофізики НАН України, вул. Василя Степанченка, 3,
Київ, Україна*

e-mail: mamilovserge@gmail.com

Serge Mamilov  <https://orcid.org/0000-0002-0175-7019>

Як цитувати: Мамілов СО. XIV Міжнародна конференція по біоніці і прикладній біофізиці. Біофізичний вісник. 2022;47:51. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-05>

In cites: Mamilov SO. XIV International conference on bionics and applied biophysics. Biophysical Bulletin. 2022;47:51. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-05> (in Ukrainian)

Open Access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

<https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-06>

ALL-UKRAINIAN CONFERENCE ON MOLECULAR AND CELL BIOLOGY WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION, DEDICATED TO THE HEROIC STRUGGLE OF THE UKRAINIAN PEOPLE AGAINST THE RUSSIAN INVADERS

On February 24, 2022, Russia invaded Ukraine and brought the war to our territory, accompanied by the terror of civilian people and destruction of civil infrastructure, including cultural, educational, and scientific objects. Scientific work was interrupted, and a lot of scientists were displaced within Ukraine or abroad. The latter has become possible due to great support from our foreign colleagues who reacted to the situation in Ukraine during the first several days of war and created a lot of opportunities for Ukrainian scientists in their countries. However, most of the scientists stayed in Ukraine, some of them even ended up in temporarily occupied territories. Regarding all these factors, the idea of an All-Ukrainian conference with international participation has arisen in the Young Scientist Council and the Scientific Council of the Institute of Molecular Biology and Genetics (IMBG) of the National Academy of Sciences of Ukraine. The main aims of this event were to encourage Ukrainian scientists wherever they are, to give the opportunity to colleagues from abroad to demonstrate their staunch support to Ukraine, and to keep the scientific process ongoing even in the background of the war. We decided to dedicate the Conference to the heroic struggle of the Ukrainian people against the Russian invaders.

The All-Ukrainian Conference on Molecular and Cell Biology with international participation was held as an online event on the Zoom platform, from the 15th to the 17th of June 2022. Three types of participation were available for registered scientists: oral presentation, poster presentation, and abstract publication only, aiming to give every scientist the possibility to participate, regardless of their personal situation (e.g., internet access or its quality). Scientists of every career stage could take part in any way convenient to them. Seven sections of bioscience were available at the Conference, namely:

- Microbiology and Biotechnology,
- Genetics and Epigenetics,
- Molecular biology and Bioorganic chemistry,
- Molecular oncology,
- Molecular physiology and Biophysics,
- Cell biology,
- System biology and Bioinformatics.

123 scientists from Ukraine and abroad have registered for participation in the conference before the deadline. The percentage distribution of participants among sections is demonstrated in Fig. 1. 38 Oral presentations, 14 Poster presentations, 10 Keynote Lectures, and 1 Special Lecture were included in the Conference program.

In cites: Mankovska OS. All-ukrainian conference on molecular and cell biology with international participation, dedicated to the heroic struggle of the ukrainian people against the russian invaders. Biophysical Bulletin. 2022;47:52–58. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-06>

Open Access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

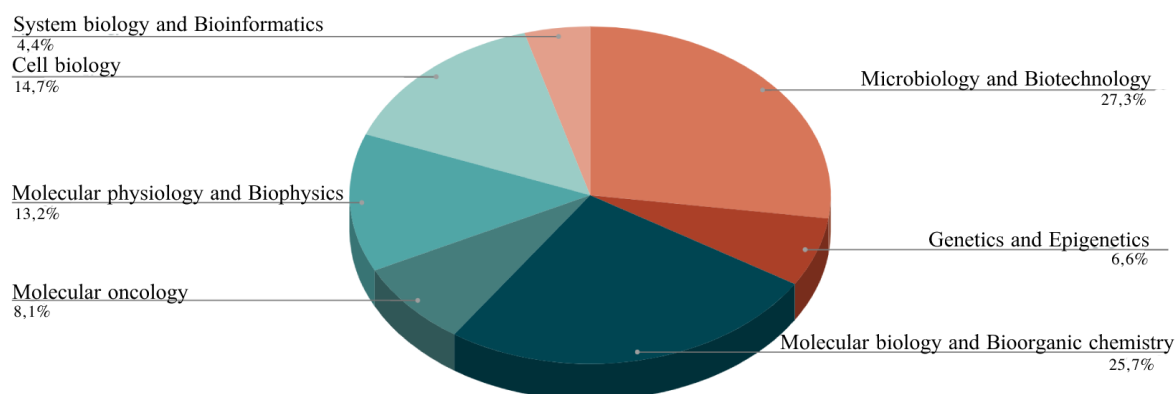


Fig. 1. Percent distribution of participants among sections (including all types of participation).

Scientists from the 13 Ukrainian cities from different regions of Ukraine registered for participation in the Conference: Kyiv, Kharkiv, Ivano-Frankivsk, Lviv, Melitopol, Kherson, Odesa, Uzhhorod, Poltava, Nizhyn, Chernivtsi, Ternopil, Cherkasy. The largest number of representatives was from Kyiv and Kharkiv. Foreign participants, including 10 Keynote Speakers, represented several European countries and USA (Fig. 2).



Fig. 2 Countries of affiliation of Conference participants including Keynote Speakers (Ukraine, Poland, Czech Republic, Germany, Italy, Sweden, Finland, USA).

The Conference was started with Opening remarks by the Director of the Institute of Molecular Biology and Genetics of the NAS of Ukraine Mykhailo Tukalo, who welcomed everybody to the Conference and stressed on the importance of such events in this challenging time for Ukraine. Three Keynote speakers presented their lectures on June 15th. Pernilla Wittung-Stafshede from the Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden was talking about protein misfolding, with special attention to α -synuclein and its role in Parkinson's disease. Cecilia Lanny Winata from the International Institute of Molecular and Cell Biology, Warsaw, Poland, who is studying the nature of the interaction between

transcription factors and epigenomic landscape and how it translates into the resulting diversity of cardiac cell identity in zebrafish model, told the participants about the construction of the gene regulatory network underlying heart development using genomics. Petr Svoboda (Institute of Molecular Genetics ASCR, Prague, Czech Republic), who devoted his research to the understanding the epigenetic regulation of the mammalian genome presented an excellent lecture about the diversity of the small RNA pathways in mammals.

After the Keynote Lectures, the “**Microbiology and Biotechnology**” section of the Conference started. The innovative and significant topics were discussed in this section, including the development of biosensors for different purposes, the investigation of novel biomaterials and modern technologies for skin regeneration, and wound healing, which are extremely actual today. **Irena Hlushchuk** (University of Helsinki, Finland) shed more light on the α -synuclein aggregation process. Three talks given by **Olena Moshynets** (Institute of Molecular Biology and Genetics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine), **Taras Baranovskyi** (Kyiv Regional Clinical Hospital, Kyiv, Ukraine), and **Kateryna Rudnieva** (Kyiv Regional Clinical Hospital, Kyiv, Ukraine) were devoted to the epidemiology of *Klebsiella pneumonia* as a nosocomial infection, the problems with this infection caused by the biofilm formation, and the ways to solve this problem. Also, their works demonstrated a productive and successful collaboration between academic scientists and clinicians. Several interesting works on microbial biotechnology were presented by the participants from the D. K. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the NAS of Ukraine.

In the next section, “**Genetics and Epigenetics**”, which consisted of three talks, the great interest of the Conference attendees attracted the talk of **Taras Oleksyk** from Oakland University (MI, USA), who described the results of the investigation of Genome Diversity in Ukraine, the unique variation, structure, and admixture in whole genome sequences of Ukrainians. The first day of the conference was finished with the **Poster Session, part I**, where excellent works of scientists from Kharkiv, Ivano-Frankivsk, and Kyiv were presented.

On June 16, the second day of the Conference was opened by the Keynote Lecture of **Michał Komorowski** from the Institute of Fundamental Technological Research of Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland. He told the audience about the signaling complexity, making a deep dive into the understanding, that the single ligand activates multiple different effectors, as well as a distinct effector is being activated by numerous different ligands, which results in cross-wired signaling, which also differs even between remarkably similar cells (Fig. 3). He introduced the listeners to information theory, which helps to understand and describe these complex processes.

The talk of the next Keynote Speaker, **Andrii Domanskyi** (University of Helsinki, Orion Pharma Turku, Finland) was devoted to targeting pathological protein aggregation in neurodegeneration, in particular to the further perspective of the usage of this knowledge in clinical practice.

Volodymyr Berest from the V. N. Karazin Kharkiv National University, Department of Molecular and Medical Biophysics in his Keynote talk presented the incredible results that the molecular interactions of the antimicrobial peptide with nano-sized delivery vehicles potentiate their action and broaden its therapeutic efficiency.

The section on “**Molecular biology and bioorganic chemistry**” was started with one more talk devoted to neurodegenerative conditions, presented by **Anastasiia Nefodova** (Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine), which points out that this topic is broadly studied and some steps were taken forward in western countries and in Ukraine, as well. She was talking about hematological markers of low-grade systemic inflammation in rats with different models of Alzheimer’s disease. In general, all 9 talks in this section demonstrated a prominent level of research in different fields of molecular biology and biochemistry. There

were presenters with applied research, namely **Maksym Sobolevskyi** and **Daryna Mruga** (Kyiv, Ukraine) with their talks about novel biosensors **Volodymyr Prokopiuk** and **Anton Tkachenko** (Kharkiv, Ukraine) with the studies with potential clinical relevance connected with the effects and behavior of nanoparticles of different nature with living cells: **Bohdana-Myroslava Briantseva** (Kyiv, Ukraine) with her research about the potential of MGMT inhibitors to modulate the action of alkylating compounds; more fundamental molecular biology research was presented by **Daria Biliai** (Chernivtsi, Ukraine), **Dmytro Gerasymchuk** (Kyiv, Ukraine), and **Ausra Domanska** (Helsinki, Finland).

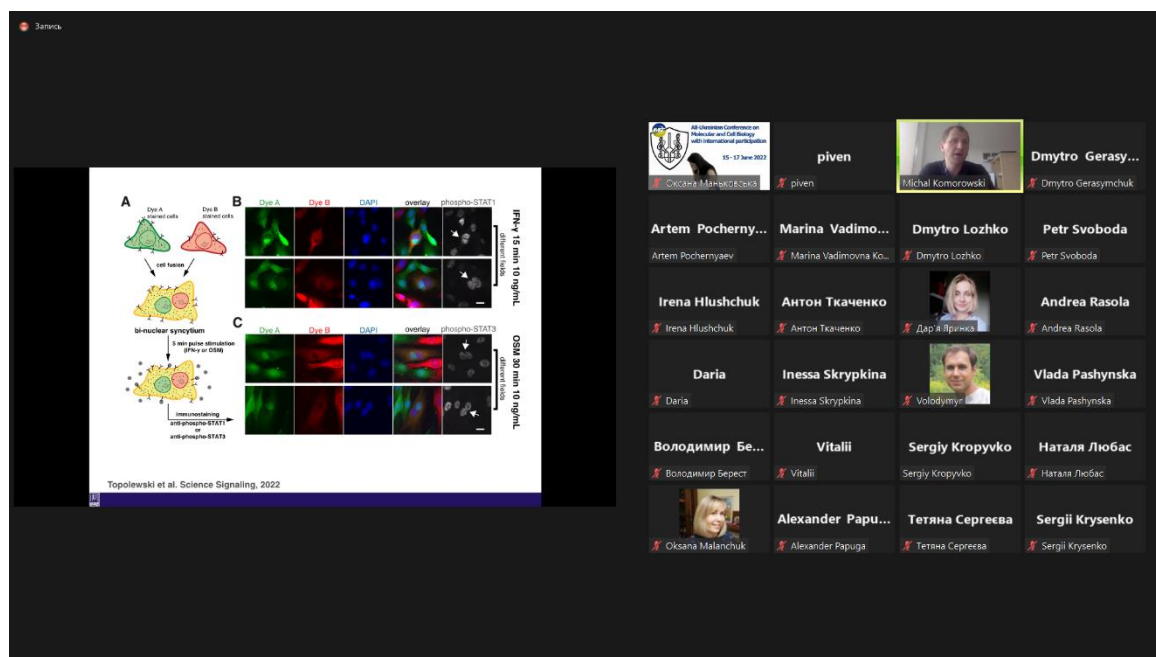


Fig. 3. A presentation fragment of Michał Komorowski's "Making sense of signaling complexity".

The section of "Molecular oncology" consisted of 4 talks, two of which were in the field of anticancer drug development. Indeed, **Nadiia Lypova** (Louisville, USA) presented her excellent study of the PFKFB3 as a target of compensatory cell signaling in response to EGFR inhibition in non-small cell lung carcinoma, and **Sergii Konovalenko** (Kyiv, Ukraine) talked about the combined effects of doxorubicin and laser irradiation on the survival of MCF7 and MCF7-DOX (doxorubicin resistant) cell lines, which can be useful for decision in therapeutic strategies choice for breast cancer. Two other talks were devoted to underlying the mechanisms of cancer formation and development. **Andrea Rasola** (Padova, Italy) made incredibly interesting presentation about the role of chaperone TRAP1 in cancer metabolic switch and **Anastasiia Hubiernatorova** (Kyiv, Ukraine) presented her work on the controversial role of tristetraprolin in breast cancer. Part II of the **Poster Session** was held at the end of the second Conference Day.

17th of June was the last closing day of the All-Ukrainian Conference on Molecular and Cell Biology with international participation. The program of this day was planned in an unusual way in comparison to previous ones. **Anton Nekrutenko**, a Keynote speaker from the Penn State University, USA, gave a deep and comprehensive introduction to GalaxyProject.org, which represents an open global system for the analysis of biological information. The next Keynote Lecture of Friday, presented by **Andreas Ladurner** (Ludwig-Maximilians-Universität, Munich, Germany), continued the topic about cancer therapy and novel targets for fighting this disease. He told the auditory about the role of ALC1 helicase in DNA repair and

the strategy of producing synthetic lethality using ALC1 inhibitors. We had the opportunity to listen to 6 talks from the section of “**Molecular physiology**” with interesting and important results obtained by Ukrainian scientists. Briefly, **Viktor Martyniuk** (Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine) reported his observations of the influence of electromagnetic radiation of millimeter range on the optical properties of the hemoglobin; **Mariia Ursatyi** (Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine) was talking about the impact of dietary protein deficiency on the state of the glutathione system in the liver of rats of reproductive age under toxic injury with acetaminophen; the presentation of **Olga Tarnopolska** (Bogomoletz Institute of Physiology, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine) was dedicated to the influence of trivalent metal ions on LCC-channels of the nuclear membrane of the cerebellar Purkinje neurons; **Sonia Nevelchuk** (Kyiv Academic University, Kyiv, Ukraine) and **Oleksandra Fedchenko** (Kyiv Academic University, Kyiv, Ukraine) talked about hippocalcin calcium-dependent insertion and its distribution between different subcellular compartments, respectively; and **Yuriy Danylovych** (O. V. Palladin Institute of Biochemistry, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine) closed the section, presenting his results of the investigation of the properties of mitochondrial NO-synthase activity in smooth muscle.

Section “**Cell Biology**” was the last section of Conference. Unfortunately, one of the participants, who was in the Conference program, **Serhii Beschasnyi** from Kherson State University Kherson, Ukraine, was not able to be present online due to the absence of internet connection in temporary occupied Kherson. Therefore, only two talks were presented in this section. **Tetiana Bukreieva** (Kyiv, Ukraine) presented her work on T cell response in patients with COVID-19. Her results demonstrated the association of the behavior of T-cell population with levels of cytokines and miRNAs in the cohort studied. **Yuriy Kolupaev** (Kharkiv, Ukraine), reported the results of his work on cell biology of plants, namely about the participation of a signal molecule H₂S in induction of wheat seedlings heat tolerance.

After the last section, the special event of the Conference, the **Panel Discussion “Viruses, evolution, and the struggle for survival. Human progress in diagnosis, therapy, and prevention”**, was performed (Fig. 4).

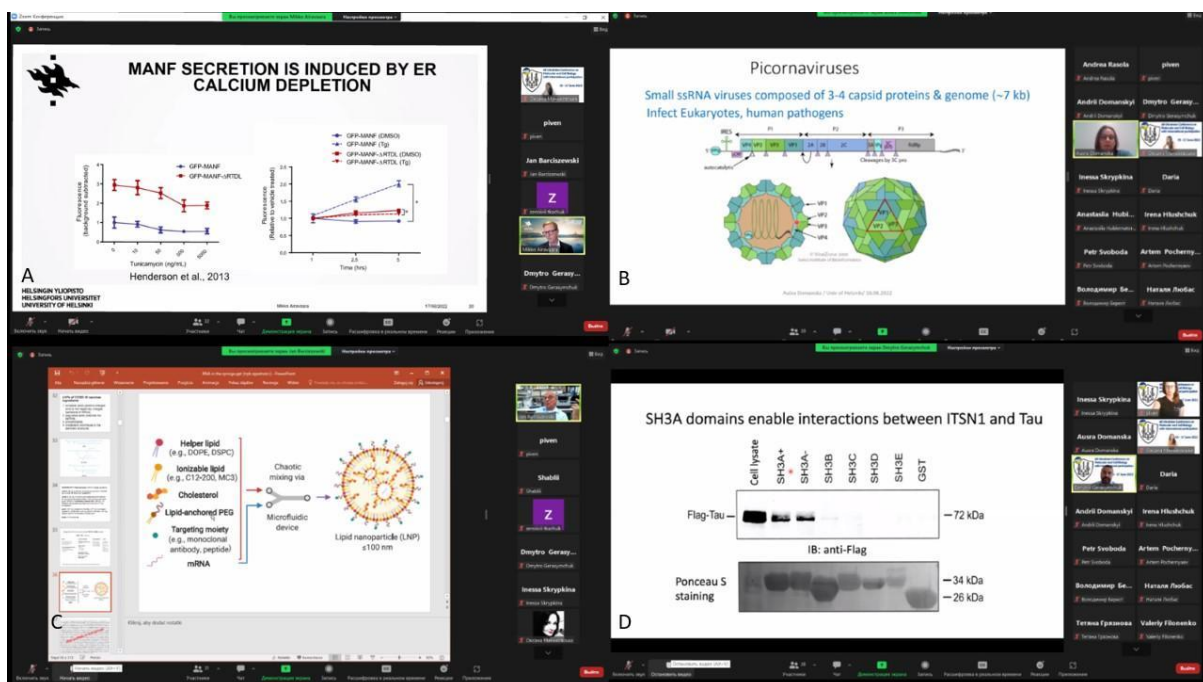


Fig. 4. Mikko Airavaara (A), Ausra Domanska (B), Jan Barciszewsky (C) and Dmytro Gerasymchuk (D) presentations fragments.

Moderated by **Dmytro Gerasymchuk** and **Oksana Piven** from the IMBG, the discussion brought the participants to the exciting journey to the world of viruses. **Olena Moshynets, Mykhailo Tukalo, Zenovii Tkachuk, Jan Barciszewski, Andrii Domanskyi** actively participated in the discussion, in particular, on the strategies of the novel antiviral therapies development.

After the **Panel discussion**, the participants and attendees of the Conference had the opportunity to listen to two more Keynote Lectures and the Special Lecture **Jan Barciszewski** (NanoBioMedical Centre at Adam Mickiewicz University, Institute of Bioorganic Chemistry of the Polish Academy of Sciences, Poznan, Poland) shared with colleagues his vast experience in the development of mRNA constructs for the introduction them inside the living cells, particularly in the context of RNA vaccine development. He mentioned all the necessary components of such constructs and talked about potential issues in this field of research. **Mikko Airavaara** (University of Helsinki, Finland) performed an outstanding lecture on Reporter pharmacology and the potential of these new tools in drug development and quantification of therapeutic efficacy. Finally, **Vitaliy Kordium** (Institute of Molecular Biology and Genetics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine) made his Special Lecture with the covert purpose to make scientists always think deeper about their research and results.

Making a summary, the **All-Ukrainian Conference on Molecular and Cell Biology with international participation, dedicated to the heroic struggle of the Ukrainian people against the Russian invaders**, was held at a high scientific level, demonstrated the diversity and high quality of research of scientists from Ukraine as well as their incredible willing to continue their work and professional development even on the background of the war and, on the other side, the outstanding support of foreign scientists to Ukrainian scientific community. The next event was pre-planned to be held in person in Ukraine when it is possible. The abstract book [1] based on the Conference proceedings is published online.

ACKNOWLEDGEMENTS

To all who supported and participated in the Conference organization (Inessa Skrypkina, Oksana Piven, Oleksandr Papuga, Svitlana Antonenko, Maksym Sobolevskyi, Dmytro Gerasymchuk, Olga Korzh, Yanina Mishchuk, Mykhailo Tukalo from Institute of Molecular Biology and Genetics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, all team of Eisbach Bio and Sascha Beck from IZB, Munich, Germany).

CONFLICT OF INTERESTS

The author declares that there is no conflict of interest.

REFERENCES

1. Proceedings of the All-Ukrainian Conference on Molecular and Cell Biology with international participation [Internet]; 2022 June 15–17; Kyiv: Institute of Molecular Biology and Genetics NAS of Ukraine; 2022. 158 p. Available from: <http://imbg.org.ua/docs/2022/Proceedings%20of%20All-Ukrainian%20Conference%20of%20Molecular%20and%20Cell%20Biology.pdf>

Oksana Mankovska

*Department of Molecular Oncogenetics, Institute of Molecular Biology and Genetics
of the National Academy of Sciences of Ukraine, 150, Zabolotnogo Str., Kyiv, Ukraine, 03143*

e-mail: mankovska@gmail.com

Oksana Mankovska  <https://orcid.org/0000-0003-2639-8494>

**ALL-UKRAINIAN CONFERENCE ON MOLECULAR AND CELL BIOLOGY WITH
INTERNATIONAL PARTICIPATION, DEDICATED TO THE HEROIC STRUGGLE OF THE
UKRAINIAN PEOPLE AGAINST THE RUSSIAN INVADERS**

O. S. Mankovska

*Department of Molecular Oncogenetics, Institute of Molecular Biology and Genetics
of the National Academy of Sciences of Ukraine, 150, Zabolotnogo Str., Kyiv, 03143, Ukraine
e-mail: mankovska@gmail.com*

The All-Ukrainian Conference on Molecular and Cell Biology with international participation was held as an online event on the Zoom platform, from the 15th to the 17th of June 2022. The purpose of this event was to encourage Ukrainian scientists, to give the opportunity to colleagues from abroad to demonstrate their support to Ukraine, and to keep the scientific process ongoing even in the background of the war. Scientists of every career stage could take part in any way convenient to them. Seven sections of bioscience were available at the Conference, namely: Microbiology and Biotechnology, Genetics and Epigenetics, Molecular biology and Biorganic chemistry, Molecular oncology, Molecular physiology and Biophysics, Cell biology and System biology, and Bioinformatics. 123 scientists from Ukraine and abroad have registered for participation in the conference. 38 oral presentations, 14 poster presentations, 10 Keynote Lectures, and 1 Special Lecture were included in the Conference program. Scientists from all over Ukraine, several European countries (Poland, Czech Republic, Germany, Italy, Sweden, Finland), and USA participated in the Conference. On the third day the Panel Discussion on the topic “Viruses, evolution, and the struggle for survival. Human progress in diagnosis, therapy, and prevention”, was performed. The abstract book, based on the Conference materials is published online.

KEY WORDS: molecular biology; cell biology; genetics; biophysics; scientific conference.

**ВСЕУКРАЇНЬСЬКА КОНФЕРЕНЦІЯ З МОЛЕКУЛЯРНОЇ ТА КЛІТИННОЇ БІОЛОГІЇ З
МІЖНАРОДНОЮ УЧАСТЮ, ПРИСВЯЧЕНА ГЕРОЇЧНІЙ БОРОТБІ УКРАЇНСЬКОГО
НАРОДУ ПРОТИ РОСІЙСЬКИХ ЗАГАРБНИКІВ**

О. С. Маньковська

*Відділ молекулярної онкогенетики, Інститут молекулярної біології і генетики НАН України,
буль. Академіка Заболотного, 150, м. Київ, Україна, 03143
e-mail: mankovska@gmail.com*

Всеукраїнська конференція з молекулярної та клітинної біології з міжнародною участю проходила як онлайн-захід на платформі Zoom з 15 по 17 червня 2022 року. Метою цього заходу було надихнути українських науковців та дати можливість колегам з-за кордону продемонструвати свою підтримку Україні, щоб продовжувати науковий процес навіть на тлі війни. Науковці будь-якого кар'єрного рівня могли взяти участь у конференції. На конференції працювало сім тематичних секцій, а саме: мікробіологія та біотехнологія, генетика та епігенетика, молекулярна біологія та біоорганічна хімія, молекулярна онкологія, молекулярна фізіологія та біофізика, клітинна біологія та системна біологія та біоінформатика. Для участі в конференції зареєструвалися 123 науковці з України та з-за кордону. До програми конференції було включено 38 усних доповідей, 14 стендових доповідей, 10 ключових лекцій та 1 спеціальну лекцію. У конференції взяли участь науковці з усієї України, ряду європейських країн (Польща, Чехія, Німеччина, Італія, Швеція, Фінляндія) та США. На третій день відбулась Панельна дискусія на тему «Віруси, еволюція та боротьба за виживання. Прогрес людини в діагностиці, терапії та профілактиці». Збірник тез, складений за матеріалами конференції, опубліковано онлайн.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: молекулярна біологія; клітинна біологія; генетика; біофізика; наукова конференція.

<https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-07>

НАДІЯ У СКРУТНІ ЧАСИ

Поточний випуск журналу «Біофізичний вісник» виходить у скрутний час боротьби нашої незалежної Української держави проти підступної агресії Російської Федерації. Усі науковці та педагогічні працівники відчули на собі усі тяготи війни, руйнування історичних будинків навчальних та наукових закладів, бібліотек та музеїв, вимушене переселення, режим дистанційної роботи. Багато випускників університетів зараз зі зброєю в руках боронять нашу країну. Незважаючи на усі негаразди воєнного стану, науковці продовжують працювати, здобуваючи нові знання та передаючи їх молодому поколінню.

Хочемо висловити окрему подяку нашим закордонним колегам, які з перших днів війни рішуче засудили російську агресію та висловили підтримку усьому народу України. Підтримку не тільки словом, але й ділом: багато закордонних наукових установ та університетів терміново організували спеціальні програми для українських вчених та прихистили у своїх закладах багато науковців, у тому числі біофізиків, надаючи їм можливість не переривати свої дослідження.

Серед інших наукових дисциплін саме біофізика дає фундаментальні знання, які дозволяють людям захиститися від шкідливого впливу різних фізичних факторів на життя та здоров'я людини та є базою для розвитку нових технологій у сучасній медицині.

Редакція «Біофізичного вісника» вдячна своїм дописувачам за цікаві та змістовні статті та висловлює надію на найскоріше досягнення мирного життя і повернення науковців до плідної роботи у рідних стінах.

Редакція «Біофізичного вісника»

HOPE IN DIFFICULT TIMES

The current issue of the journal "Biophysical Bulletin" is published at a difficult time of the struggle of our independent Ukrainian country against the insidious aggression of the Russian Federation. All scientists and pedagogical workers suffered all the hardships of the war, the destruction of historical buildings of educational and scientific institutions, libraries and museums, forced relocation, and remote work mode. Many university graduates are now defending our country with weapons in their hands. Despite all the troubles of martial law, scientists continue to work, acquiring new knowledge and transferring it to the younger generation.

We would like to express our special gratitude to our foreign colleagues who, from the first days of the war, strongly condemned the Russian aggression and expressed their support for the entire people of Ukraine. Support not only in words but also in deeds: many foreign scientific institutions and universities urgently organized special programs and sheltered many Ukrainian scientists, including biophysicists, in their labs, giving them the opportunity not to interrupt their research.

Among other scientific disciplines, it is biophysics that provides fundamental knowledge that allows people to protect themselves from the harmful effects of various physical factors and creates the basis for the advancement of new technologies in modern medicine.

The editors of "Biophysical Bulletin" are grateful to contributors for interesting and informative articles, which help to bring victory and hope for the fast resumption of a peaceful life and the return of scientists to fruitful work in their home labs.

Editorial Board of "Biophysical Bulletin"

Як цитувати: Надія у скрутні часи. Біофізичний вісник. 2022;47:59. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-07>

In cites: Hope in difficult times. Biophysical Bulletin. 2022;47:59. <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-07>

Open Access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ

В редакцію подається електронний варіант статті (MS Word 2007 і вище) українською або англійською мовою через сайт журналу <http://periodicals.karazin.ua/biophysvisnyk> з направленням установи і експертним висновком у вигляді відсканованих файлів.

Текст набирається на аркушах формату А4 через один інтервал. Використовується шрифт Times New Roman 12 pt, вирівнювання тексту по ширині. Поля справа і зліва по 2,5 см, зверху – 3,5 см, знизу – 2 см. Математичні та хімічні символи вводяться до тексту статті за допомогою редактора MathType або Microsoft Equation. Рисунки, придатні до репродукції, у форматі *.emf, *.wmf, *.jpg, *.jpeg, *.png вставляються до тексту в межах площі сторінки, вказаної вище. Рисунки розміщувати в межах таблиці з прозорими зовнішніми границями у першому рядку, підпис та коментарі до рисунку – у другому рядку таблиці. Графіки будуються у програмних пакетах, призначених для обробки і візуалізації наукових даних: Origin, Mathcad тощо. Використання офісного пакету MS Excel для побудови графіків не допускається. Цифри і підписи на осях та надписах повинні мати шрифт 9 pt. Підписи під рисунками друкуються шрифтом 10 pt. Формули, таблиці й рисунки нумеруються послідовно арабськими цифрами, наприклад, (1); Табл. 1; Рис. 1. Якщо стаття написана українською мовою, підписи до рисунків і таблиць дублюються англійською мовою.

На першій сторінці зверху на першому рядку в лівому верхньому куті наводиться УДК (курсив, 11 pt). Після пропуску одного рядка, розміщується назва статті (великі літери, прямий напівжирний шрифт, 12 pt, вирівнювання по центру). Після пропуску одного рядка набираються ініціали, прізвища авторів (прямий напівжирний шрифт, 12 pt, вирівнювання по центру). На наступному рядку розміщуються повні назви й адреси установ, де виконувалась робота, адреса електронної пошти автора – контактної особи (курсив, 10 pt, вирівнювання по центру). Потім вміщується дата надходження статті до редакції: число – цифрами, місяць – прописом, рік – цифрами (шрифт прямий, 10 pt, вирівнювання по центру). На наступному рядку вміщується дата прийняття статті до друку (заповнюється редколегією).

Після пропуску одного рядка вміщуються два реферати (українською та англійською мовами). Реферат мовою статті розміщується першим. Перед другим рефератом з нового рядка пишеться назви статі (великими літерами, шрифт прямий, 10 pt, напівжирний, вирівнювання по центру), ініціали та прізвища авторів (шрифт прямий 10 pt, напівжирний, вирівнювання по центру), назви організацій та їх адреси (курсив 9 pt., вирівнювання по центру). Реферат повинен бути структурованим та містити наступні частини з заголовками: **Актуальність, Мета роботи, Матеріали і методи, Результати, Висновки**, які починаються з нового рядка. Слова “Реферат” і “Abstract” не пишуться. Заголовки структурних частин пишуться напівжирним шрифтом, після заголовка ставиться крапка. Текст реферату складає не менше 1800 та не більше 2000 фонетичних символів, тобто без проміжків між словами; прямий шрифт 10 pt. Реферати другою мовою також повинен мати обсяг не менше 1800 та не більше 2000 фонетичних символів. На наступному рядку вміщуються 5-8 ключових слів, які розділяються між собою крапкою з комою (10 pt – перший реферат, 9 pt – другий та третій реферати). З початку рядка великими літерами, шрифт напівжирний, пишеться заголовок з двокрапкою “**КЛЮЧОВІ СЛОВА:**”. Тексти рефератів і ключові слова мають ширину на 1 см меншу, ніж основний текст (по 0,5 см з кожного боку). Реферати розділяються одним пустим рядком.

Основний текст статті наводиться після пропуску одного рядка шрифтом Times New Roman (Cyr), 12 pt. Абзаци починаються з червоного рядка (0,75 см). Рекомендується розбиття статті на такі розділи: вступ (назва розділу не пишеться), **МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ** (обов'язково для експериментальних робіт), **РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ, ВИСНОВКИ**. Для теоретичних робіт передбачається більш вільне розташування матеріалу, наприклад, замість розділу **МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ** рекомендуються розділи **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ, МОДЕЛЬ** та ін. Розділи не нумеруються, літери великі, напівжирні, вирівнювання по центру. При необхідності розділи поділяються на підрозділи. Назви підрозділів пишуться з великої літери і виділяються напівжирним шрифтом, вирівнювання по центру. Розділи або підрозділи розділяються одним пустим рядком. Після назв розділів і підрозділів крапка не ставиться. У кінці тексту статті після пропуску одного рядка у розділі **ПОДЯКА** зазначається назва фонду, який фінансував роботу, і номер гранту. Потім розміщується розділ **КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ**, у якому автори декларують наявність фінансових або інших конфліктів інтересів, які могли вплинути на результати, інтерпретацію та висновки дослідження. Якщо немає конфлікту інтересів, так і потрібно заявити: «Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів». Потім розміщується розділ **Authors' ORCID ID**, у якому автори вказують адреси своїх профілів ORCID.

Літературні посилання нумеруються в порядку цитування в тексті, номер посилання пишеться у квадратних дужках. Не допускаються посилання на неопубліковані роботи, підручники та навчальні посібники. Список літератури (шрифт 10 pt.) розміщується за основним текстом статті, виділяється як розділ **REFERENCES** і оформлюється згідно з міжнародним стилем оформлення списку наукових публікацій **Vancouver**. Приклади оформлення бібліографічних посилань можна подивитись на сайті журналу у розділі «Керівництво для авторів»: <https://periodicals.karazin.ua/biophysvisnyk/about/submissions>.

Рукописи оформлені не у відповідності до наведених правил не розглядатимуться!

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

Electronic files of the contributions (created in MS Word 2007 and later versions) written in English or Ukrainian, scans of the expert inference directive and directive from the author's institution should be sent to the Editorial Office online via the website <http://periodicals.karazin.ua/biophysvisnyk>.

A manuscript should be typed in single spacing on A4 paper. Use the MS Word with following options: 12 points Times New Roman font, text justified. Left and right margins should be 2.5 cm, the upper margin should be 3.5 cm, and bottom one should be 2 cm. Mathematical and chemical symbols, equations, and formulae should be inserted in the text by computer means (MathType or Microsoft Equation). Figures should be computer-generated in software packages intended for processing and visualization of scientific data: Origin, Mathcad, etc. The use of the MS Office Excel is not recommended. Use computer printed symbols for axes labeling. Insert prepared images into an MS Word file as files in *.emf, *.wmf, *.jpg, *.jpeg, *.png format within the area of the page specified above. We recommend the following layout: images are placed in the first row of the table with transparent outer borders, legends and comments to figures are placed in the second row of the table. The font size of figure legends should be 9 points. Formulae, tables, figures should be numbered consecutively using Arabic numerals, e.g. (1), Table 1, Fig 1. If the article is written in Ukrainian, captions to figures and tables are duplicated in English.

Insert UDK in the first line on the left of a first page (11 pt, Italic). Leave one line blank. Place the title of the paper in capital letters (12 pt, bold, centered) on the next line. After one blank line type initials and surnames of the authors (12 pt, bold, centered). On the next line type the authors' affiliation and postal addresses of the institution where the actual work was done, including an e-mail address of the corresponding author (10 pt, Italic, centered). Then, place the date of the paper submission: day — in numbers, month — in words, year — in numbers (straight font, 10 pt, centered). Then, place the date of the paper submission (to be filled by editor).

After one blank line place two abstracts of the paper (written in Ukrainian and English). The first abstract should be written in the language of the manuscript. On the next line provide the second abstract (capital letters, straight font, 10 pt, bold, centered). Above the second abstract place the titles of the paper in the second language (capital letters, straight font, 10 pt, bold, centered), then — initials and surnames of the authors (straight font, 10 pt, bold, centered), and finally — the authors' affiliation names and addresses (9 pt, Italic, centered), every time starting from a new line. The abstract should be structured and consist of the following parts with headings: **Background, Objectives, Materials and Methods, Results, Conclusions**, each placed on a new line. The words “Резюме” and “Abstract” should be omitted. The headers of structural parts are written in bold letters, putting a dot after the header. The two abstracts of the paper should contain not less than 1,800 and not more than 2,000 phonetic symbols (i.e., without taking into account the spacing between words); straight font, 10 pt. On the next line type 5-8 key words, separated by a semicolon (10 pt — first abstract, 9 pt — second and third abstracts). Next, the header “**KEY WORDS:**” should be typed in bold capital letters at the beginning of the line. The texts of the abstracts and key words should be indented 0.5 cm from the left and right margins. The abstracts should be separated by a blank line.

Then, leave one blank line before starting to type the text of the paper with following options: Times New Roman font, 12 pt, text justified. The first line of each paragraph should be indented 0.75 cm from the left margin. Each manuscript should contain the following elements: an introduction (heading of this section should be omitted), **MATERIALS AND METHODS** (obligatory for experimental studies), **RESULTS AND DISCUSSION**, **CONCLUSIONS**. For theoretical less specified text organization is envisaged, e.g., instead of section **MATERIALS AND METHODS**, the sections **PROBLEM FORMULATION** or **MODEL** are recommended, etc. The sections are not numbered, capital letters, bold, centered. Sections may be subdivided into subsections, if necessary. Subsection Headings are centered and should be bold and capitalized. Leave one blank line after each section or subsection. A dot should be omitted after headings of sections and subsections. Names of the foundations and grant numbers should be included in the section **ACKNOWLEDGMENTS** at the end of the text after one blank line. The next section should be **CONFLICT OF INTEREST** in which you should declare financial or any other conflict of interest. If there is no conflict of interest, you can state: “The authors declare that there is no conflict of interest.” The next section should be **Authors' ORCID ID** in which you should include ORCID internet addresses of all authors.

References to the literature should be cited in the text consecutively by Arabic numerals in square brackets. The citation of unpublished papers, textbooks and tutorials are prohibited. List of references (10 pt) should be given at the end of the manuscript as a separate section **REFERENCES**, formatted according to the **Vancouver** style for scientific publications.

The examples for reference formats are given on the journal's website in the "Author Guidelines": <https://periodicals.karazin.ua/biophysvisnyk/about/submissions>.

Manuscripts that do not meet the requirement mentioned above will not be considered for publication!

Наукове видання

“Біофізичний вісник”

Вип. 47

Збірник наукових праць

Укр. та англ. мовами.

Комп’ютерне верстання к.ф.-м.н. Горобченко О. О.

Підписано до друку 30.06.2022. Формат 60×84 1/8.
Папір офсетний. Друк ризографічний.
Ум. друк. арк. 4,97. Обл.-вид. арк. 5,78. Наклад 50 пр.

61022, Харків, майдан Свободи, 4
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Надруковано: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
61022, Харків, майдан Свободи, 4, тел. +38-057-705-24-32
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.09