

Абдул–Огли Лариса Володимирівна доктор медичних наук, професор кафедри фізіології, Дніпровський державний медичний університет, м. Дніпро, <https://orcid.org/0000-0002-6942-2397>

Олійник Катерина Анатоліївна аспірант кафедри анатомії людини, клінічної анатомії та оперативно-хірургії, Дніпровський державний медичний університет, м. Дніпро, <https://orcid.org/0009-0002-4874-5741>

Рутгайзер Вікторія Георгіївна доктор філософії за фахом медицина, доцент, доцент кафедри анатомії людини, клінічної анатомії та оперативної хірургії Дніпровського державного медичного університету, м. Дніпро <https://orcid.org/0000-0001-7868-8253>

Кошарний Дмитро Володимир учень комунальний заклад освіти «Науковий медичний ліцей «Дніпро» Дніпропетровської обласної ради»

Попова Тетяна Вікторівна к.біол.н., доцент кафедри фізіології, Дніпровський державний медичний університет, м. Дніпро, <https://orcid.org/0000-0001-9627-330X>

Скубицька Людмила Дмитрівна викладач, кафедра фізіології, Дніпровський державний медичний університет, м. Дніпро, <https://orcid.org/0000-0002-4153-9446>

ОЦІНКА МІКРОСКОПІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ СТРУКТУРНИХ КОМПОНЕНТІВ ОБОЛОНОК СТІНКИ ОЧНОГО ЯБЛУКА З МЕТОЮ ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ УДАРНО - ХВИЛЬОВОГО ВПЛИВУ

Анотація. Сучасні збройні конфлікти супроводжуються активним застосуванням вибухових засобів ураження та артилерійського озброєння, що істотно підвищує рівень травматизму серед військовослужбовців і цивільного населення. У таких умовах спостерігається суттєве зростання кількості випадків черепно-мозкових травм, які належать до найбільш поширених і небезпечних ушкоджень нервової системи та часто спричиняють тривалі функціональні порушення організму. Разом із тим механізми ураження структур ока, зокрема сітківки, при черепно-мозковій травмі залишаються недостатньо вивченими. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на уточнення патогенетичних механізмів ушкодження, а також удосконалення методів ранньої діагностики та оцінки ступеня таких змін.

У статті розглянути особливості посттравматичних змін стінки оболонок очного яблука, які виникають після впливу поверхневої ударної хвилі в органу зору. Вищенаведені данні свідчать про надзвичайну складову проблеми травматичних та посттравматичних уражень трьох оболонок очного яблука, на мікроскопічному рівні яких спостерігали порушення трофічної функції – на першу, сьому, чотирнадцяту та тридцяту добу експерименту. На мікроскопічному рівні у гострий період в рогівці спостерігались прояви деформації у вигляді зміни товщини оболонки і її стоншення к ранньому, пізньому та віддаленому періодах.

У судинній оболонці у гострий та ранній періоди спостерігали розширення судин і потоншення стінки судин, що супроводжувалось порушенням трофічної функції та мікроциркуляції, які прогресували у пізній та віддалений періоди. У сітківці, після дії ударної хвилі, у гострий та ранній періоди спостерігались дегенеративні зміни – набряк клітинного шару нейронів, їх реорганізація, деформація, а у пізній та віддалений періоди – прогресування порушення трофічної функції та нейродегенеративних змін.

Ключові слова: очне яблуко, рогівка, судинна оболонка, сітківка, ударна хвиля, експеримент.

Abdul-Ogly Larisa Volodymyrivna Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department of Human Anatomy, Clinical Anatomy and Operative Surgery, Dnipro State Medical University, Dnipro, <https://orcid.org/0000-0002-6942-2397>

Oleinyk Kateryna Anatoliyivna graduate student of the Department of Human Anatomy, Clinical Anatomy and Operative Surgery, Dnipro State Medical University, Dnipro <https://orcid.org/0009-0002-4874-5741>

Rutgayzer Viktoria G. Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Human Anatomy, Clinical Anatomy and Operative Surgery, Dnipro State Medical University, Dnipro <https://orcid.org/0000-0001-7868-8253>

Kosharny Dmytro V. student municipal educational institution "Scientific Medical Lyceum "Dnipro" of the Dnipropetrovsk Regional Council"

Popova Tetiana Viktorivna PhD, Associate Professor of the Department of Physiology, Dnipro State Medical University, Dnipro, <https://orcid.org/0000-0001-9627-330X>

Scubitska Luydmila Dmytrivna Physiology Teacher, Department of Physiology, Dnipro State Medical University, Dnipro, <https://orcid.org/0000-0002-4153-9446>

EVALUATION OF MICROSCOPIC FEATURES OF STRUCTURAL COMPONENTS OF THE EYE BALL WALL SHELVES FOR THE PURPOSE OF PREDICTING THE CONSEQUENCES OF SHOCK WAVE IMPACT

Abstract. Modern armed conflicts are accompanied by the active use of explosive weapons and artillery weapons, which significantly increases the level of injuries among military personnel and civilians. In such conditions, there is a significant increase in the number of cases of traumatic brain injuries, which are among the most common and dangerous injuries to the nervous system and often cause long-term functional disorders of the body. At the same time, the mechanisms of damage to the structures of the eye, in particular the retina, in traumatic brain injury remain poorly understood. This necessitates further research aimed at clarifying the pathogenetic mechanisms of damage, as well as improving methods for early diagnosis and assessment of the degree of such changes.

The article examines the features of post-traumatic changes in the wall of the eyeball membranes that occur after the impact of a surface shock wave on the organ of vision. The above data indicate an extraordinary component of the problem of traumatic and post-traumatic lesions of the three membranes of the eyeball, at the microscopic level of which trophic function disorders were observed - on the first, seventh, fourteenth and thirtieth day of the experiment. At the microscopic level, in the acute period, manifestations of deformation were observed in the cornea in the form of changes in the thickness of the membrane and its thinning in the early, late and remote periods. In the choroid in the acute and early periods, vasodilation and thinning of the vascular wall were observed, which was accompanied by a violation of trophic function and microcirculation, which progressed in the late and remote periods. In the retina, after the action of the shock wave, in the acute and early periods, degenerative changes were observed - swelling of the cell layer of neurons, their reorganization, deformation, and in the late and remote periods - progression of trophic function disorders and neurodegenerative changes.

Keywords: eyeball, cornea, choroid, retina, shock wave, experiment.

Постановка проблеми. Сучасні військові конфлікти характеризуються широким застосуванням вибухових пристроїв, артилерійських систем та інших видів високотравматичної зброї. Унаслідок цього значно зростає кількість випадків черепно-мозкової травми серед як військовослужбовців, так і цивільного населення. Відомо, що значна частка постраждалих із ЧМТ має різноманітні порушення зорових функцій, які можуть проявлятися зниженням гостроти зору, розладами акомодатції, порушенням поля зору або іншими офтальмологічними змінами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі остаточно сформувалася концепція травматичної хвороби як системного порушення життєдіяльності організму, що виникає внаслідок дії надмірного механічного

агента та супроводжується формуванням складного комплексу взаємопов'язаних функціональних і структурних розладів. Травматичне ушкодження розглядається не лише як локальне порушення цілісності тканин, а як багатокомпонентний патологічний процес, що охоплює нейрогуморальні, гемодинамічні, метаболічні та імунні механізми регуляції. У різні періоди травматичної хвороби спостерігається неоднакова вираженість цих змін — від гострої фази з домінуванням шоківих реакцій до стадії компенсації або декомпенсації з формуванням віддалених наслідків. Водночас реалізуються адаптивні та пристосувальні реакції, спрямовані на збереження гомеостазу, однак за умов надмірного або тривалого впливу вони можуть набувати патологічного характеру.

Одразу після дії травматичного фактора запускається каскад інтенсивних катаболічних процесів, що супроводжуються різким зростанням потреби тканин в енергії, активацією стрес-реалізуючих систем та розвитком енергетичного дефіциту клітинної організації, особливо на рівні мікроциркуляторного русла [1, 2, 3]. Порушення мікрогемодинаміки, зміни судинного тону, підвищення проникності судинної стінки та розвиток локальної ішемії створюють підґрунтя для вторинних ушкоджень тканин. Судинний компонент у цьому контексті відіграє ключову роль, оскільки саме через нього реалізується доставка кисню, глюкози та інших субстратів, необхідних для підтримання метаболізму клітин.

На сьогодні відомо, що стан судинної оболонки можна об'єктивно оцінити за допомогою сучасних інструментальних методів, зокрема ангіографії, лазерної доплерівської флоуметрії, ультразвукового дослідження та спектральної оптичної когерентної томографії, яка забезпечує високоточне вимірювання товщини судинної оболонки та аналіз її морфоструктурних параметрів [4–8]. Використання цих методик дозволяє не лише виявляти ранні порушення перфузії, але й кількісно оцінювати динаміку змін у відповідь на травматичний вплив, що має важливе діагностичне та прогностичне значення.

Відомо, що однією з найбільш ранніх реакцій кровоносних судин сітківки при патологічних станах є їх розширення, яке розглядається як прояв метаболічної ауторегуляції, спрямованої на посилення кровопостачання та забезпечення підвищених метаболічних потреб нейросенсорної тканини [9].

Однак тривале або надмірне навантаження на мікроциркуляторне русло призводить до структурних змін, зокрема втрати перицитів — ключових клітин, що забезпечують стабільність капілярної стінки та регуляцію кровотоку.

Апоптоз перицитів, індукований, наприклад, високим вмістом глюкози, продемонстрований як у дослідженнях *in vitro*, так і *in vivo* [10], що свідчить про універсальність цього механізму ушкодження.

Оскільки перицити виконують функцію структурної підтримки капілярів і беруть участь у підтриманні гематоретинального бар'єру, їх втрата зумовлює локалізоване вибухання стінок капілярів з формуванням мікроаневризм [11]. Додатково до цього апоптоз ендотеліальних клітин, потовщення базальної мембрани та зміни міжклітинних контактів сприяють підвищенню проникності

судинної стінки і порушенню цілісності гематоретинального бар'єру [12]. У результаті формуються умови для ексудації плазми, розвитку набряку та прогресування дегенеративних процесів у тканинах ока.

Таким чином, для глибокого розуміння патофізіологічної суті офтальмологічної травми принципово важливим є комплексний аналіз змін не лише на органному, а й на тканинному та клітинному рівнях. Саме багаторівневий підхід дозволяє простежити взаємозв'язок між первинним механічним ушкодженням, судинними розладами, метаболічними порушеннями та структурною перебудовою оболонок очного яблука. У зв'язку з цим у нашому експериментальному дослідженні було проведено всебічне вивчення морфофункціональних змін усіх оболонок стінки очного яблука з метою уточнення механізмів їх ушкодження та адаптації в умовах травматичного впливу.

Мета дослідження. Встановлення посттравматичних мікроскопічних змін структурних компонентів оболонок стінки очного яблука після впливу поверхневої ударної хвилі в різні періоди часу - на першу, сьому, чотирнадцяту та тридцяту добу експеримента.

Матеріал і методи: Всього в експерименті брало участь 84 щура, які були розподілені на чотири експериментальні групи – гострий, ранній, пізній та віддалений періоди (по 21 щуру в кожній групі). За час проведення роботи, внаслідок впливу ударної хвилі, ні одна тварина не загинула. В нашому експерименті ми дослідили вплив ударної хвилі за допомогою другої експериментальної моделі, але з доповненими особливостями, відповідно отриманому патенту України (Пат. 146858 Україна, МПК G09B23/28). Експерименти з лабораторними тваринами відповідали етичним вимогам Європейської конвенції з використання хребетних тварин для експериментів. Евтаназію тварин по закінченні експерименту проводили введенням летальної дози тіопенталу натрію. Для вивчення структурних компонентів оболонок стінки очного яблука експериментальних щурів використовували серійні гістологічні зрізи, які були забарвлені гематоксилін – еозином.

Виклад основного матеріалу. За результатами проведеного експериментального дослідження органу зору на гістологічному рівні ми спостерігали посттравматичні зміни у всіх оболонках очного яблука. На мікроскопічному рівні у гострий період в рогівці спостерігались прояви деформації у вигляді зміни товщини оболонки і її стоншення к ранньому, пізньому та віддаленому періодах (рис.1 - А, Б) .

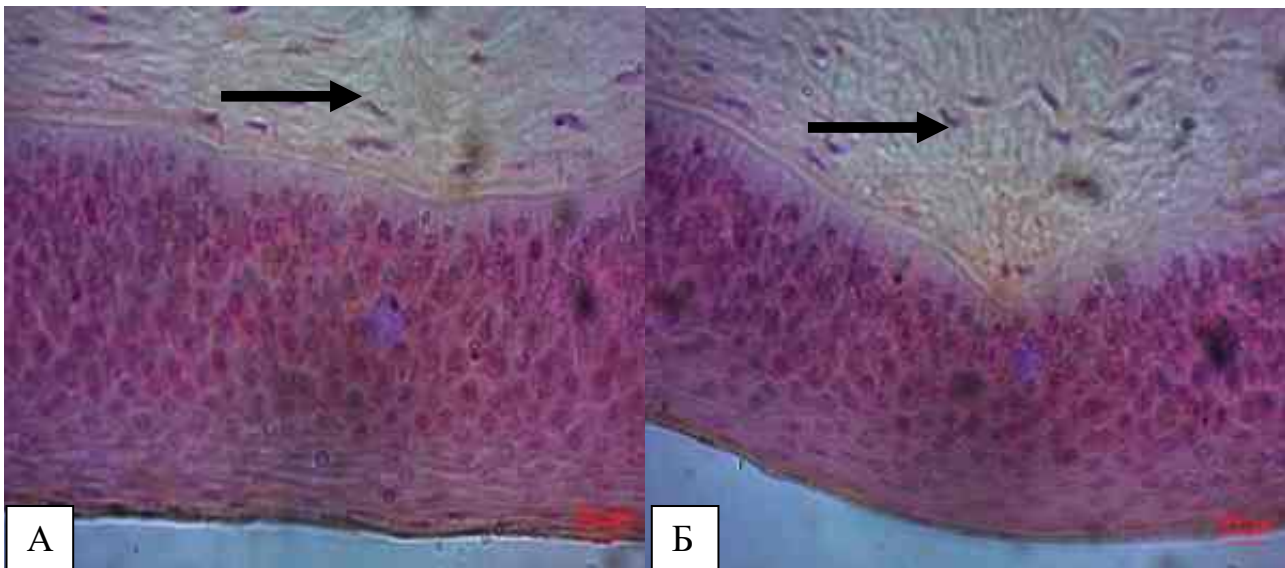


Рисунок 1 - Зріз через рогівку щура експериментальних груп. 1 – епітелій; 2 – передня базальна мембрана; 3 – власна речовина рогівки (substantia propria).

Примітка: забарвлення гематоксиліном та еозином; scale bar А, Б = 20 μm . Стрілками вказані каналці рогівки.

У судинної оболонці у гострий та ранній періоди спостерігали розширення судин і візуально потовщення цієї оболонки, але потоншення стінки судин, що супроводжувалось порушенням трофічної функції та мікроциркуляції, які прогресували у пізній та віддалений періоди. У сітківці, після дії ударної хвилі, у гострий та ранній періоди спостерігались дегенеративні зміни – набряк клітинного шару нейронів, їх реорганізація і деформація, а у пізній період – прогресування порушення трофічної функції і дегенеративних змін у складових клітинних шарів нейронів сітківки і окремих нейронів, які з'єднані з пігментним епітелієм сітківки, що вистилає судинну оболонку в задній частині ока, а у віддалений період - прогресування нейродегенеративних змін у зв'язку з розкладанням або відмиранням нейронів, що призводить до руйнування фоторецепторів і можливої втрати зору (рис. 2 - А, Б).

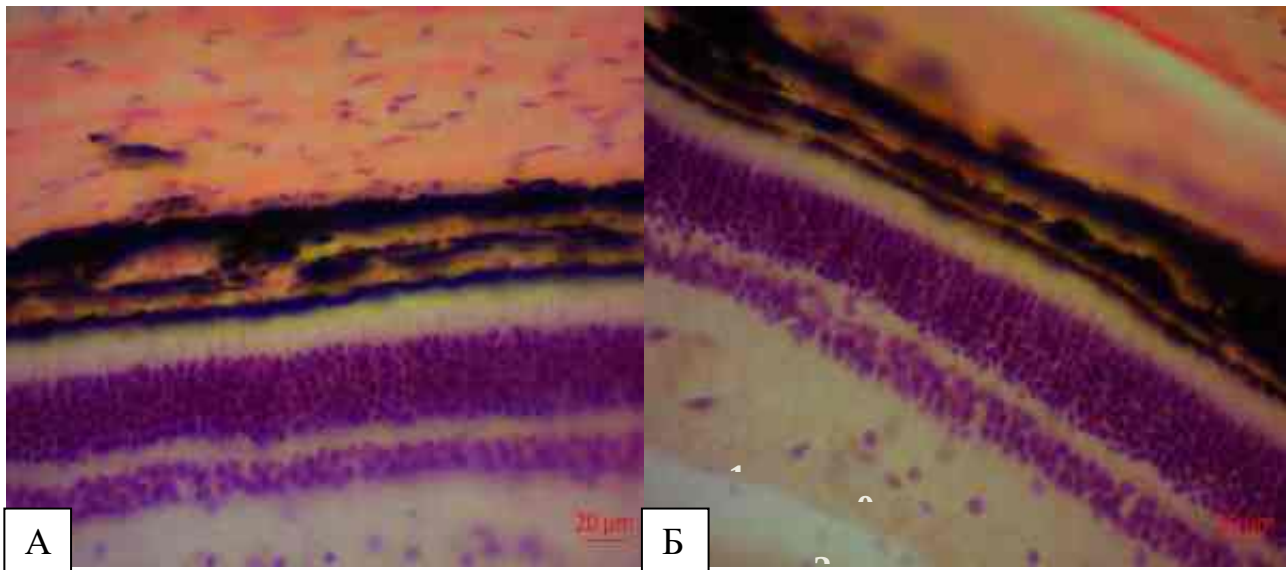


Рисунок 2 – Сітківка очного яблука у посттравматичному періоді.

Примітка: забарвлення гематоксилином та еозином; scale bar = 20 μm .

А – на сьому добу – у ранній період. Б – на чотирнадцяту добу – у пізній період експерименту. 1 – склера; 2 судина оболонка; 3 - пігментний епітелій; 4 – шар колбочок і паличок; 5- зовнішня прикордонна мембрана; 6 – зовнішній нуклеарний шар; 7 – зовнішній сітчастий плексиформний шар; 8 - внутрішній нуклеарний шар; 9 - внутрішній сітчастий плексиформний шар; 10 – гангліозні клітини гангліонарного шару; 11 – шар нервових волокон зорового нерва; 12 – внутрішня прикордонна мембрана.

Висновки: Таким чином, за допомогою експериментальної моделі були з'ясовані усі наслідки посттравматичних мікроскопічних змін на рівні усіх оболонок стінки очного яблука.. Вищенаведені данні свідчать про надзвичайну складову проблеми травматичних ушкоджень очного яблука та посттравматичних змін, які відбуваються на рівні усіх трьох оболонок стінки очного яблука, які прогресують від гострого до віддаленого періоду після впливу поверхневої ударної хвилі.

Перспективи подальших досліджень. У подальшому належить виявити та досконало дослідити імуногістохімічні посттравматичні зміни структур кіркового кінця зорового аналізатору у потиличній долі після вибухової хвилі.

Література:

1. Allen RS, Motz CT, Feola A, Chesler KC, Haider R, Ramachandra Rao S, Skelton LA, Fliesler SJ, Pardue MT. Long -Term Functional and Structural Consequences of Primary Blast Overpressure to the Eye. J Neurotrauma. 2018 Sep 1; 35 (17): 2104 – 2116.
2. Choi JH, Greene WA, Jonson AJ, Chavko M, Cleland JM, McCarron RM, Wang HC. Pathophysiology of blast – induced ocular trauma in rats after repeated exposure to low – level blast overpressure. Clin Exp Ophthalmol. 2015 Apr; 43 (3):239 – 46.
3. Слободян О. М., Пенішкевич Я. І. Морфологічна оцінка діабетичної ретинопатії / О. М. Слободян, Я. І. Пенішкевич // Клінічна анатомія та оперативна хірургія – Т. 21, № 4 – 2022. DOI: 10.24061/1727-0847.21.4.2022.51.

4. Hammer SS, Busik JV. The Role of Dyslipidemia in Diabetic Retinopathy. *Vision Res.* 2017;139:228-236.
5. Natrus LV, Gayova LV, Byhovets MYu, Osadchuk YuS, Konovalov SE. The value of regulatory effects on lipid metabolism in during complicated diabetes mellitus. *Fiziologichnyi Zhurnal.* 2020;66(1):25-34. [in Ukrainian].
6. Марченко Д.Г. Похил А.В. Мікроструктура сітківки та патогенез її дегенерації / Морфологія. - 2025. –Т. 19 №4 (156). – С. 113 - 120. <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2025.4.113-120>
7. Hu A, Schmidt MHH, Heinig N. Microglia in retinal angiogenesis and diabetic retinopathy. *Angiogenesis.* 2024;27(3):311-331. doi:10.1007/s10456-024-09911-1
8. Mahendran Y, Ågren J, Uusitupa M, Cederberg H, Vangipurapu J, Stančáková A, et al. Association of erythrocyte membrane fatty acids with changes in glycemia and risk of type 2 diabetes. *Am J Clin Nutr.* 2014 Jan;99(1):79-85. doi: 10.3945/ajcn.113.069740.
9. Koehrer P, Saab S, Berdeaux O, Isaïco R, Grégoire S, Cabaret S, et al. Erythrocyte phospholipid and polyunsaturated fatty acid composition in diabetic retinopathy. *PLoS One.* 2014 Sep 4; 9(9): e106912. doi: 10.1371/journal.pone.0106912.
10. Harris WS, Luo J, Pottala JV, Margolis KL, Espeland MA, Robinson JG. Red Blood Cell Fatty Acids and Incident Diabetes Mellitus in the Women's Health Initiative Memory Study. *PLoS One.* 2016 Feb 16;11(2): e0147894. doi: 10.1371/journal.pone.0147894.
11. Castro- Correia C, Sousa S, Norberto S, Matos C, Domingues VF, Fontoura M, Calhau C. The Fatty Acid Profile in Patients with Newly Diagnosed Diabetes: Why It Could Be Unsuspected. *Int J Pediatr.* 2017;2017:6424186. doi: 10.1155/2017/6424186.
12. Bukowiecka- Matusiak M, Burzynska- Pedziwiatr I, Sansone A, Malachowska B, Zurawska- Klis M, Ferreri C, et al. Lipid profile changes in erythrocyte membranes of women with diagnosed GDM. *PLoS One.* 2018 Sep 14;13(9): e0203799. doi: 10.1371/journal.pone.0203799.

References:

1. Allen RS, Motz CT, Feola A, Chesler KC, Haider R, Ramachandra Rao S, Skelton LA, Fliesler SJ, Pardue MT. Long-term functional and structural consequences of primary blast overpressure to the eye. *J Neurotrauma.* 2018;35(17):2104-2116. DOI: <https://doi.org/10.1089/neu.2017.5394>
2. Choi JH, Greene WA, Jonson AJ, Chavko M, Cleland JM, McCarron RM, Wang HC. Pathophysiology of blast-induced ocular trauma in rats after repeated exposure to low-level blast overpressure. *Clin Exp Ophthalmol.* 2015;43(3):239-246. DOI: <https://doi.org/10.1111/ceo.12458>
3. Slobodian, O.M., & Penishkevych, Ya.I. (2022). Morfolohichna otsinka diabetychnoi retynopatii [Morphological evaluation of diabetic retinopathy]. *Klinichna anatomii ta operatyvna khirurgiia*, 21(4). <https://doi.org/10.24061/1727-0847.21.4.2022.51> [in Ukrainian].
4. Hammer SS, Busik JV. The role of dyslipidemia in diabetic retinopathy. *Vision Res.* 2017;139:228-236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.visres.2017.04.010>
5. Natrus LV, Gayova LV, Byhovets MYu, Osadchuk YuS, Konovalov SE. The value of regulatory effects on lipid metabolism during complicated diabetes mellitus. *Fiziol Zh.* 2020;66(1):25-34. DOI: <https://doi.org/10.15407/fz66.01.025>
6. Marchenko, D.H., & Pokhyl, A.V. (2025). Mikrostruktura sitkivky ta patohenez yii deheneratsii [Microstructure of the retina and pathogenesis of its degeneration]. *Morfologiya*, 19(4), 113–120. DOI: <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2025.4.113-120> [in Ukrainian].
7. Hu A, Schmidt MHH, Heinig N. Microglia in retinal angiogenesis and diabetic retinopathy. *Angiogenesis.* 2024;27(3):311-331. doi:10.1007/s10456-024-09911-1

8. Mahendran Y, Ågren J, Uusitupa M, Cederberg H, Vangipurapu J, Stančáková A, et al. Association of erythrocyte membrane fatty acids with changes in glycemia and risk of type 2 diabetes. *Am J Clin Nutr.* 2014;99(1):79-85. DOI: <https://doi.org/10.3945/ajcn.113.069740>
9. Koehrer P, Saab S, Berdeaux O, Isaïco R, Grégoire S, Cabaret S, et al. Erythrocyte phospholipid and polyunsaturated fatty acid composition in diabetic retinopathy. *PLoS One.* 2014;9(9):e106912. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106912>
10. Harris WS, Luo J, Pottala JV, Margolis KL, Espeland MA, Robinson JG. Red blood cell fatty acids and incident diabetes mellitus in the Women's Health Initiative Memory Study. *PLoS One.* 2016;11(2):e0147894. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147894>
11. Castro-Correia C, Sousa S, Norberto S, Matos C, Domingues VF, Fontoura M, Calhau C. The fatty acid profile in patients with newly diagnosed diabetes: why it could be unsuspected. *Int J Pediatr.* 2017;2017:6424186. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/6424186>
12. Bukowiecka-Matusiak M, Burzynska-Pedziwiatr I, Sansone A, Malachowska B, Zurawska-Klis M, Ferreri C, et al. Lipid profile changes in erythrocyte membranes of women with diagnosed GDM. *PLoS One.* 2018;13(9):e0203799. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203799>

Дата першого надходження статті до видання: 01.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.03.2026