

УДК 612.84:616-001.31-007.23-092.9:534.222.2
DOI: 10.24061/1727-0847.24.2.2025.27

Л. В. Абдул-Огли, К. А. Олійник

*Кафедра анатомії людини, клінічної анатомії та оперативної хірургії (зав. – проф. О. О. Нефьодова)
Дніпровського державного медичного університету, м. Дніпро*

СУЧАСНИЙ СТАН ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ВПЛИВУ УДАРНОЇ ХВИЛІ НА СТРУКТУРИ ОЧНОГО ЯБЛУКА

Резюме. В роботі розглянути особливості будови очного яблука та основні характеристики і послідовність змін, які виникають після впливу вибухової хвилі у органу зору. Вищенаведені дані свідчать про надзвичайну складову проблеми травматичних та посттравматичних уражень структур очної ямки, відносно будови очного яблука. Так, розвиток посттравматичних ушкоджень очного яблука знаходиться у прямій залежності від характеру, тяжкості, об'єму ушкодження, їх пролонгованих проявів – індивідуальних та варіабельних, що значною мірою ускладнюють швидку діагностику і, як наслідок – визначення критеріїв лікування. Під час бойових дій вибух є основною причиною поранень і пошкоджень зорової системи. Серед усіх ушкоджень більш характерна для очного яблука формування гідростатичного шоку та проходження хвиль через очні ямки. Вище зазначалося, що дві треті усіх бойових уражень органу зору комбінуються з пораненнями інших ділянок тіла. Тому імовірно, що у зв'язку з цим, з однією сторони, військові офтальмологи повинні мати певний рівень знань та навичок поетапного лікування загально хірургічних поранених, а з іншої сторони, загальні хірурги, які у воєнний час зустрічаються з пораненням ока, повинні мати знання у травматології органу зору та анатомо-фізіологічних особливостей очного яблука людини. Також проаналізували сучасний стан експериментальної моделі ударно-індукованої травми. Ми не аналізували усі особливості посттравматичних уражень структур очної ямки після ударно-вибухової хвилі, висвітлення цих питань будуть присвячені наступні роботи.

Ключові слова: експериментальна модель, вибухова хвиля, очне яблуко, орбіта, нейротравма, посттравматичні ураження, анатомія.

В умовах бойових дій, які у теперішній час відбуваються в Україні, дві треті усіх бойових уражень органу зору комбінуються з пораненнями інших ділянок тіла [1]. Незважаючи на довічну інвалідність, яку передбачає втрата зору, існує лише мала кількість досліджень на тваринах, які присвячені оцінці впливу вибухових хвиль на зорову систему за допомогою експериментальних моделей. Але під час моделювання кожен дослідник повинен спланувати алгоритм чітко побудованих дій експерименту, обґрунтувати способи та пристрій для генерації патогенного фактору, термін та тривалість експерименту, стать та вік тварин, способи контролю та кількісного визначення фізичних, хімічних та інших характеристик серед факторів ударно-хвильового впливу, що досліджують [2]. Основною вимогою до експериментальної моделі ударно-хвильової травми повинна бути однократна або багаторазова дія патогенного чинника, що дає змогу відтворити максимально природні патологічні зміни та фази у тварин, які відбуваються під час реальної клінічної ситуації [3]. Окрім цього, отриманий результат, який встановлюється за допомогою

морфологічних, фізіологічних, біохімічних або інших методів досліджень, має бути пов'язаний із дією шкідливого компоненту ударно-хвильового впливу [4, 5]. У теперішній час експериментальні моделі ударно-хвильової травми поділяється на дві основні експериментальні моделі травми: ударно-вибухові хвилі відкритого поля, коли пристрій підривається на відкритому місці та ударної труби, в якій використовується стиснений газ, який є альтернативою вибуховим речовинам, оскільки труба безпечніша та легше в управлінні. Хоча вибух у відкритому полі є найбільш точним відображенням складної клінічної ситуації, але створювані ударні хвилі є складними, і ці ефекти важко оцінити, але для дослідження травм очей було використано друга модель – ударні труби, яка складається із привідної секції на закритому кінці відокремленої від приведеної секції крихкою або розривною діафрагмою, що складається з лавсану або ацетату целюлози. Процес починається з піддув у закритій секції драйвера і коли тиск досягає критичного рівня, діафрагма розривається, створюючи ударну хвилю відомою інтенсивності, які є при-

чиною окремих ушкоджень [6, 7]. Розрізняють три основні механізми ушкодження внаслідок дії первинної сили вибуху: інерцію, відшарування, імпульзію. Інерційний ефект вибуху зумовлений його впливом на суміжні тканини різної щільності, які набувають різного прискорення під дією вибухової хвилі. У результаті між двома суміжними тканинами виникають сили розтягнення та зміщення, що спричиняє мікро- та макроскопічні розриви на поверхні розподілу тканин. Хвилі вибухові або відбиваються від них, або, внаслідок зміщення спричиняють розрив судин, забиття головного та спинного мозку, очей, серця, легень та мезентеріальні ушкодження. Відшарування виникає, коли вибухова хвиля рухається з поверхні розділу – середовища з більшою щільністю до середовища з меншою щільністю, яку утворюють стінки альвеол легень з повітрям, яке в них міститься, печінка і шлунково-кишковий тракт. Імпульзію спостерігають, коли вибухова хвиля високого тиску стискає заповнені газом порожнини: ушкодження барабанної перетинки, легень, шлунково-кишкового тракту. Проте, головний мозок, орган зору реагує на вибух як неоднорідна тканина, тому внаслідок рівного впливу інерції, вибухова хвиля спричиняє зміщення на поверхні розподілу між їх структурами [8]. У офтальмологічній хірургічній практиці пошкодження очей поділяють на наскрізні, проникні й поверхневі. Також, до зорових травм належать контузії, термічні та хімічні опіки, потрапляння в очне яблуко сторонніх тіл. Чим сильніше внутрішньоочні крововиливи, випадання внутрішніх тканин або розвиток інфекції, тим складніші ті ускладнення, які можуть призвести до втрати ока у потерпілого, але своєчасна кваліфікована допомога, яка базується у першу чергу на знаннях морфології та патофізіології усіх процесів, які відбуваються у структурах очного яблука дозволить запобігти тяжким ускладненням та втрату зору. Нині існують роботи по методу корекції механічної травми окремо рогівки, але комплексного дослідження відносно усіх структур очного яблука після впливу ударної хвилі у літературі нами не виявлялись [9]. Отже, враховуючи велику соціальну значимість ушкоджень органу зору та в окремих випадках, його втрату, необхідність оперативної тактики залежно від виду травматичного впливу, наше дослідження зосередило увагу на питаннях експериментального дослідження посттравматичних змін органу зору та його оболонок, зокрема, виразності морфологічних змін, тому – дослідження ремоделюючих процесів апарату зору після дії ударної хвилі у різні проміжки часу є актуальним.

Мета дослідження: встановлення морфологічних змін оболонок очного яблука за допомогою експериментальної моделі вибуху – пристрою для гене-

рації патогенного фактору після впливу ударної хвилі у гострий, ранній, пізній та віддалений періоди.

Матеріал і методи. Проведено дослідження 60 щурів-самців, які знаходилися у звичайних умовах під систематичним спостереженням і були розподілені на контрольну та чотири експериментальні групи – гострий, ранній, пізній та віддалений періоди (по 12 щурів в кожній групі). Для того, щоб провести експеримент – моделювання впливу вибухової хвилі до початку експерименту застосовувався галотан (Halothane, Germany), який використовували у вигляді інгаляційного наркозу. Це високоактивний засіб для інгаляційного наркозу, який спричиняє анагезуючу і міорелаксуючу дію, він блокує симпатичні ганглії, спричиняє розширення кровоносних судин шкіри та м'язів, підвищує тонус блукаючого нерва, спричиняючи брадикардію, знижує внутрішньоочний тиск. Він здійснює безпосередній вплив на міокард, знижує систолічний об'єм та скоротливість міокарда і підвищує чутливість міокарда до катехоламінів. Він не подразнює дихальні шляхи, не збільшує секрецію слини та виділення бронхіального секрету, чинить деяку бронхолітичну дію, пригнічує кашлевий та блювотний рефлекс, але потрібно пам'ятати, що щура не годують мінімум за 3 години до надання наркозу. Не впливає на вуглеводний обмін, пропорційно інтенсивності наркозу знижує скоротливу здатність біометрії. Формула – $\text{BrC}_2\text{HClC}_2\text{F}_3$ молекулярна маса – 197,4. Проводили вплив ударної хвилі на головний (краніальний) відділ тварини, тому її розташували горизонтально (подовжньо), головним відділом до мембрани з фіксацією шиї, кінцівок, хвоста за допомогою фігурної металевої конструкції з затиском у горизонтальному положенні на животі (рис. 1 – А, Б). На відкритому кінцевому отворі камери низького тиску закріпили гумову діафрагму. Підключенням пристрою до стандартної електричної мережі активували електромагнітний клапан, який перекрив сполучення між камерами високого та низького тиску. Наступним етапом додано в дію компресор, який упродовж 10 с нагнітав повітряну суміш у камеру високого тиску. Після досягнення відповідного тиску, в дію, було застосовано електромагнітний клапан, який відкрив сполучення. А потік повітряної суміші з надлишковим тиском вивільнюється в камеру низького тиску. Одночасно після включення електромагнітного клапану відбулося відключення компресора. Досягнувши вихідного кінця, цей потік повітря з ударною хвилею зруйнував діафрагму та вплинув місцево на піддослідного щура і розриву діафрагми було зафіксовано сенсором динамічного тиску (рис. 2 – А, Б). Отже, запропонований пристрій для дослідження дії на орган зору щура ударної хви-

лі забезпечує відтворення повітряної ударної хвилі з мінімальним реактивним ефектом та широким діапазоном пікового тиску в лабораторних умовах без застосування спеціальних засобів та персоналу, але з чіткою послідовністю дій, що і дає змогу відтвори-

ти патологічні фази у тварин, які відбуваються під час реальної ситуації, що надає змогу обґрунтувати цю якісну модель впливу такого патогенного чинника, особливо у теперішніх умовах, як ударна хвиля на структури зорового аналізатору.

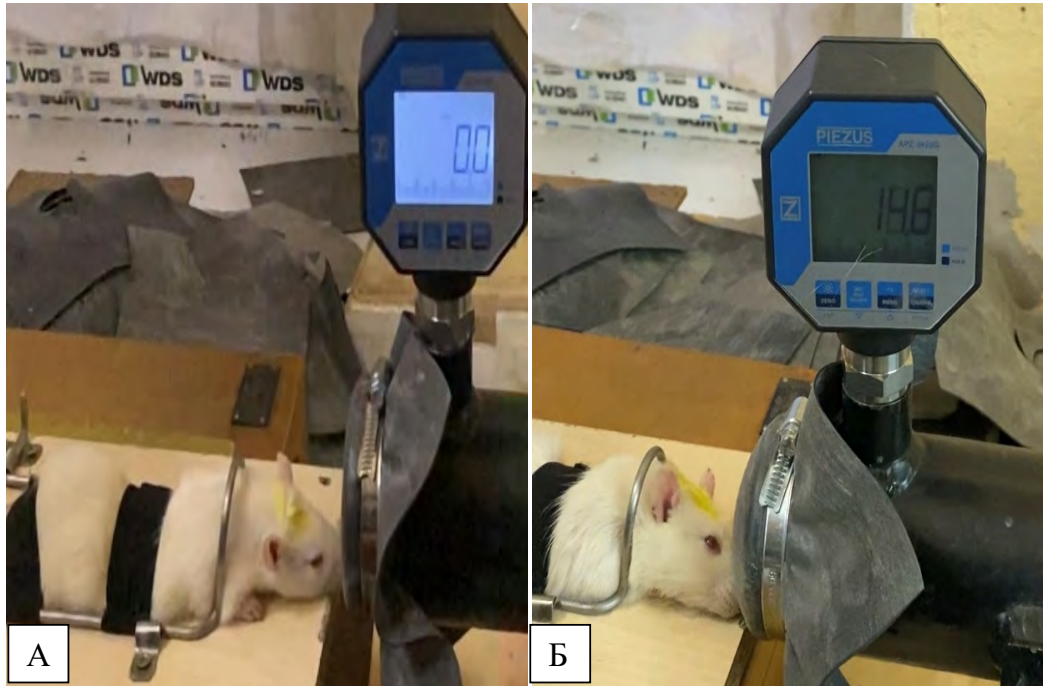


Рис. 1. М'яка фіксація та дослідження дії на орган зору щурів ударної хвилі вибуху до початку експерименту (А) та наприкінці (Б)

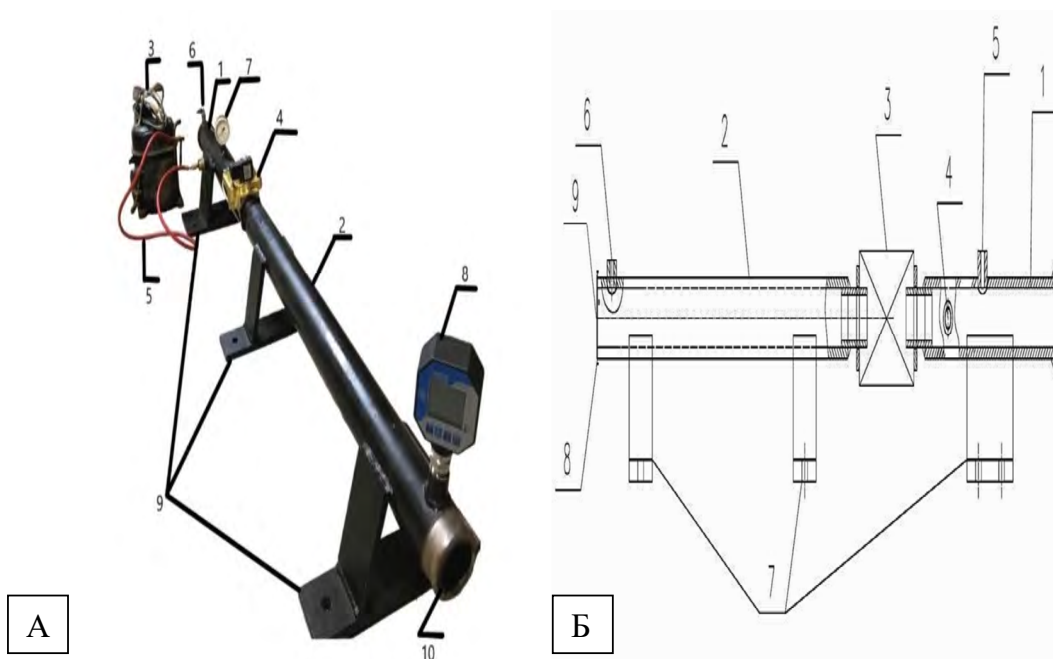


Рис. 2. Пристрій для фіксації (А, Б) та дослідження дії на орган зору щурів ударної хвилі вибуху

Примітка: 1 – камера високого тиску; 2 – камера низького тиску; 3 – електромагнітний клапан; 4 – отвір для закріплення манометру; 5 – отвір для нагнітання повітряної суміші; 6 – отвір для датчика вимірювання динамічного тиску; 8 – відкритий кінцевий отвір з одноразовою гумовою діафрагмою; 9, 7 – три металеві опори для закріплення на поверхні

У нашому експерименті щури піддавалися струнній обробці обличчя, тобто удар піддавався на все обличчя, при чому ніс був спрямований у бік трубки, а очі були розташовані з обох боків голови, що дає велике поле зору. За час проведення роботи внаслідок впливу ударної хвилі, ні одна експериментальна тварина не вмерла. Під загальним знеболенням – внутрішньоперитонеальне введення тіопенталу натрію в дозі 5 мг/кг маси тіла в комбінації з натрієм оксибутиратом – 35 мг/кг, щурів вводили в тіопенталовий наркоз перед тим, щоб оперувати та виводити з експерименту, після чого призначали забір біологічного матеріалу, до того ж призначали огляд та стан очного яблука та здійснювали евтаназію тварин здійснювали під тіопентал-натрієвим знечуленням, шляхом декапітації, після чого проводили забір матеріалу. Дослідження проведені з дотриманням основних положень Закону України № 3447 – IV від 21.02.06 р. «Про захист тварин від жорстокого поводження» (2006), Директиви Ради Європи 2010/63 EU щодо експериментів на тваринах.

Препарування використовувалося для виділення очного яблука щурів контрольної групи та чотирьох експериментальних груп після впливу ударної хвилі у гострий – на першу добу, ранній – на сьому, пізній – на чотирнадцяту та віддалений період – на тридцяту добу. В результаті дослідження, під час анестезії спостерігалось зниження тонічного скорочення кругових м'язів ока і повіки щура залишались широко відкритими. Тому ми змогли проаналізувати первинні наслідки ударної хвилі на очне яблуко, завдяки змінам у кольору та його відтінків так як, насамперед, поверхні їхньої очей отримали основний удар хвилі, який проводили за допомогою ударної труби зі стисненим повітрям у різні періоди часу.

Результати дослідження та їх обговорення.

При морфологічному візуальному обстеженні в гострий період на першу добу насамперед спостерігали набряк, гіперемію та крововиливи у фіброзну тканину очного яблука, яка складається зі склери (білкової оболонки та рогівки) (рис. 3). За результатами проведеного експериментального дослідження очного яблука у ранній період на сьому добу візуально спостерігали також набряк, але колір очного яблука щурів був більш блідий у зрівнянні з кольором зовні очного яблука у гострий період. У пізній

період на чотирнадцяту добу відносно контрольної групи ми спостерігали набряк та візуально крововиливи вже не спостерігались, але зміна кольору очного яблука змінювалась до землистого відтінку, що нами інтерпретувалось як прояви дегенеративних змін на ударну хвилю у цей період, а у віддалений період на тридцяту добу набряк візуально був значно менший на протязі усіх експериментальних груп і зміни кольору були теж з землистим відтінком, але більш мутним, який помічався зразу, на перший погляд, у зв'язку з прогресуванням нейродегенеративних змін на цей період після впливу. Статистична обробка матеріалу проводилася з використанням пакета програм «Microsoft Excel» (2010). Перевірку показників за нормальний розподіл здійснювали за тестом Колмогорова-Смірнова. За умов нормального розподілу статистична значущість різниці між середніми арифметичними оцінювалась за критерієм Ст'юдента-Фішера. При ненормальному розподілу у непарних групах визначення статистичної значущості отриманих результатів проводили за методом Манна-Уїтні.

Висновок. Отже, умови змодельованого ударно-хвильового впливу за допомогою другої експериментальної моделі та гістопатологічні ушкодження, які специфічні для очного яблука свідчать про те, що дана експериментальна модель може бути корисною для дослідження терапевтичних та хірургічних втручань, що надає можливість теоретичного обґрунтування можливих заходів протизапальної дії, як протидії первинному впливу ударної хвилі на оболонки ока. Вищенаведені данні свідчать про надзвичайну складову проблеми травматичних та посттравматичних уражень структур очної ямки, відносно будови очного яблука макроскопічно на протязі чотирьох періодів. Так, розвиток посттравматичних ушкоджень очного яблука знаходиться у прямій залежності від характеру, тяжкості, об'єму ушкодження, їх пролонгованих проявів – індивідуальних та варіабельних, що значною мірою ускладнюють швидку діагностику і, як наслідок – визначення критеріїв лікування.

Перспективи подальших досліджень. У подальшому належить виявити та досконало дослідити гістомікроскопічні зміни у оболонках очного яблука та посттравматичні зміни структур очної ямки після ударно-хвильового впливу за допомогою додаткових методик у морфології та патоморфології.

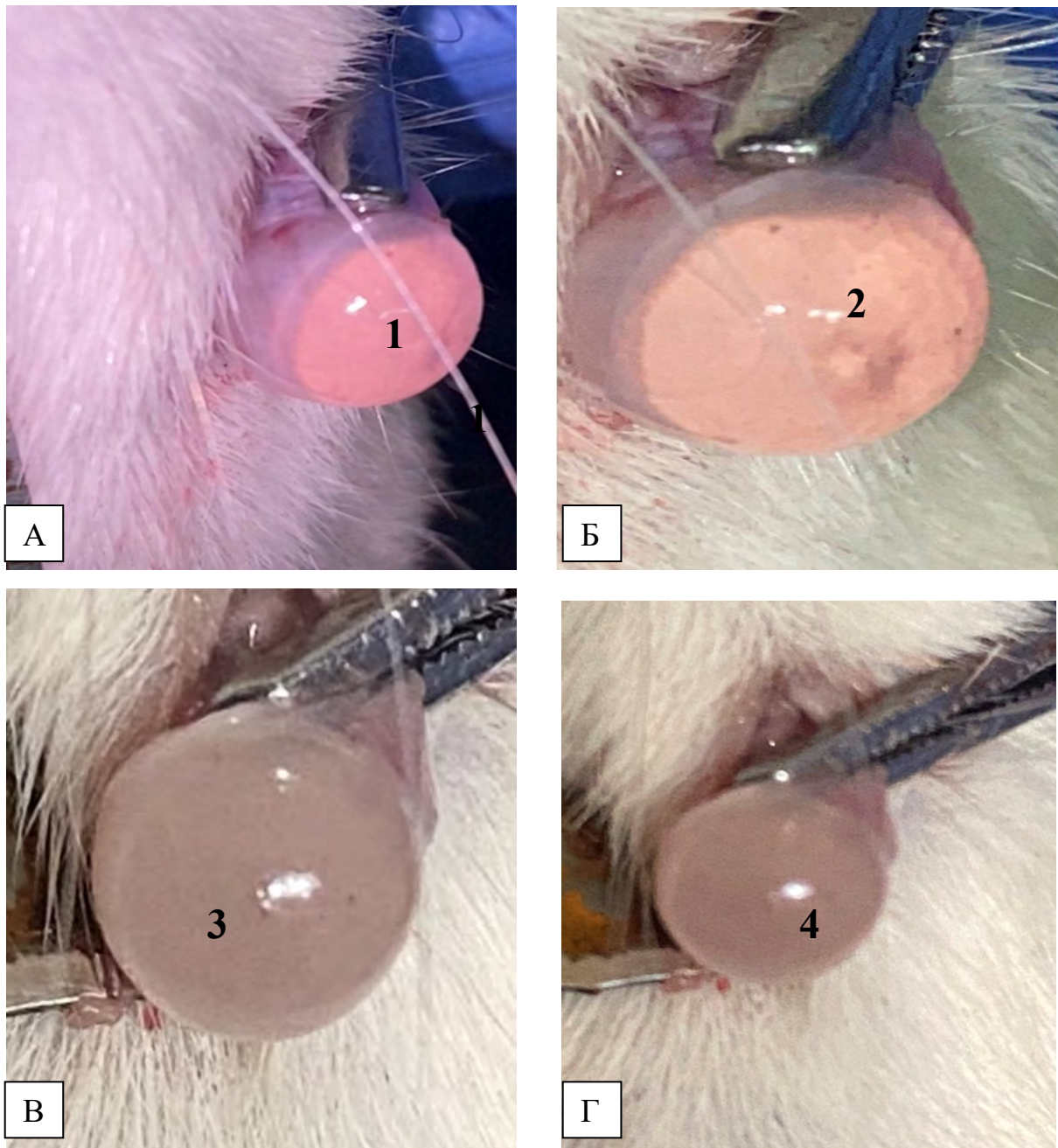


Рис. 3. Макропрепарат очного яблука після ударно-хвильового впливу у гострий (А), ранній (Б), пізній (В) та відділений періоди (Г)

Примітка: 1 – очне яблуко щурів на першу добу; 2 – на сьому добу; 3 – на чотирнадцяту добу; 4 – на тридцяту добу експерименту

Список використаної літератури

1. Allen RS, Motz CT, Feola A, Chesler KC, Haider R, Ramachandra Rao S, et al. Long-Term Functional and Structural Consequences of Primary Blast Overpressure to the Eye. *J Neurotrauma*. 2018 Sep 1;35(17):2104-16. doi: 10.1089/neu.2017.5394.
2. Choi JH, Greene WA, Johnson AJ, Chavko M, Cleland JM, McCarron RM, et al. 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. doi: 10.1111/ceo.12407.

3. Kozlova YuV, Kosharnij AV, Korzachenko MA, Kytova IV. Retrospective analysis and current state of experimental models of blast induced trauma. *Український журнал медицини, біології та спорту*. 2020;5,6(28):66-71. DOI: 10.26693/jmbs05.06.066.
4. Кошарний ВВ, Каграманян АК, Абдул – Огли ЛВ, Рутгайзер ВГ, Демченко ОМ. Мікроскопічні зміни у структурах нефрону тканини нирок після вибуховоіндукованої травми. *Вісник проблем біології і медицини*. 2024;3(174):289-98. DOI: 10.29254/2077-4214-2024-3-174-289-298.
5. Кошарний ВВ, Каграманян АК, Рутгайзер ВГ, Грузд ВВ, Кошарний ДВ, Волошин ВЛ. Порівняльна характеристика морфофункціональних змін паренхіми нирок та структур нефрону після вибуховоіндукованої експериментальної травми. *Клінічна анатомія та оперативна хірургія*. 2024;23(4):90-7. DOI: 10.24061/1727-0847.23.4.2024.73.
6. Thomas CN, Bernardo-Colón A, Courtie E, Essex G, Rex TS, Blanch RJ, et al. Effects of intravitreal injection of siRNA against caspase-2 on retinal and optic nerve degeneration in air blast induced ocular trauma. *Sci Rep*. 2021 Aug 19;11(1):16839. doi: 10.1038/s41598-021-96107-y.
7. Watson R, Gray W, Sponsel WE, Lund BJ, Glickman RD, Groth SL, et al. Simulations of Porcine Eye Exposure to Primary Blast Insult. *Transl Vis Sci Technol*. 2015 Aug 25;4(4):8. doi: 10.1167/tvst.4.4.8.
8. Сірко АГ, Дзяк ЛА. Бойові вогнепальні черепно – мозкові поранення. Дніпро: ТОВ «Пергам»; 2017. 280 с.
9. Бідзіля МР, Кліщ ІМ. Морфологічні зміни рогівки при непроникній механічній травмі та за умов корекції корнерегелем і стовбуровими клітинами. *Клінічна анатомія та оперативна хірургія*. 2025;24(1):58-66. DOI: <https://doi.org/10.24061/1727-0847.24.1.2025.09>.

References

1. Allen RS, Motz CT, Feola A, Chesler KC, Haider R, Ramachandra Rao S, et al. Long-Term Functional and Structural Consequences of Primary Blast Overpressure to the Eye. *J Neurotrauma*. 2018 Sep 1;35(17):2104-16. doi: 10.1089/neu.2017.5394.
2. Choi JH, Greene WA, Johnson AJ, Chavko M, Cleland JM, McCarron RM, et al. 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. doi: 10.1111/ceo.12407.
3. Kozlova YuV, Kosharnij AV, Korzachenko MA, Kytova IV. Retrospective analysis and current state of experimental models of blast induced trauma. *Ukrayins'kyi zhurnal medytsyny, biolohiyi ta sportu*. 2020;5,6(28):66-71. DOI: 10.26693/jmbs05.06.066. [in Ukrainian].
4. Kosharnyy VV, Kahramanyan AK, Abdul – Ohly LV, Ruthayzer VH, Demchenko OM. Mikroskopichni zminy u strukturakh nefronu tkanyny nyrok pislya vybukhovoidukovanoyi travmy. *Visnyk problem biolohiyi i medytsyny*. 2024;3(174):289-98. DOI: 10.29254/2077-4214-2024-3-174-289-298. [in Ukrainian].
5. Kosharnyy VV, Kahramanyan AK, Ruthayzer VH, Hruzd VV, Kosharnyy DV, Voloshyn VL. Porivnyal'na kharakterystyka morfofunktsional'nykh zmin parenkhimy nyrok ta struktur nefronu pislya vybukhovoidukovanoyi eksperymental'noyi travmy. *Klinichna anatomiya ta operativna khirurgiya*. 2024;23(4):90-7. DOI: 10.24061/1727-0847.23.4.2024.73. [in Ukrainian].
6. Thomas CN, Bernardo-Colón A, Courtie E, Essex G, Rex TS, Blanch RJ, et al. Effects of intravitreal injection of siRNA against caspase-2 on retinal and optic nerve degeneration in air blast induced ocular trauma. *Sci Rep*. 2021 Aug 19;11(1):16839. doi: 10.1038/s41598-021-96107-y.
7. Watson R, Gray W, Sponsel WE, Lund BJ, Glickman RD, Groth SL, et al. Simulations of Porcine Eye Exposure to Primary Blast Insult. *Transl Vis Sci Technol*. 2015 Aug 25;4(4):8. doi: 10.1167/tvst.4.4.8.
8. Sirko AH, Dzyak LA. Boyovi vohnepal'ni cherepno – mozkovy poranennya. Dnipro: TOV «Perham»; 2017. 280 s. [in Ukrainian].
9. Bidzilya MR, Klishch IM. Morfolohichni zminy rohivky pry nepronykniy mekhanichniy travmy ta za umov korektsiyi kornerehelem i stovburovymy klitynamy. *Klinichna anatomiya ta operativna khirurgiya*. 2025;24(1):58-66. DOI: <https://doi.org/10.24061/1727-0847.24.1.2025.09>. [in Ukrainian].

CURRENT STATE OF EXPERIMENTAL POSSIBILITIES OF SHOCK WAVE EFFECTS ON EYEBALL STRUCTURES

Abstract. This work the structural features of the eyeball, along with the primary characteristics and sequential changes that occur after the impact of an explosive wave on the organ of vision. The above data indicate the significant challenges posed by traumatic and post-traumatic injuries to the structures of the eye socket, given the anatomical features of the eyeball. The development of post-traumatic injuries to the eyeball is directly dependent on the nature, severity, and extent of the damage, as well as their prolonged manifestations, which are individual and variable, significantly complicating rapid diagnosis and, consequently, the determination of treatment criteria. During combat, explosions are the primary cause of injuries and damage to the visual system. Among all injuries, the formation of hydrostatic shock and the passage of waves through the eye sockets are more characteristic of the eyeball. It has been noted that two-thirds of all combat-related injuries to the organ of vision are combined with injuries to other body areas. Therefore, it is natural that, on one hand, military ophthalmologists should possess a certain level of knowledge and skills in the staged treatment of general surgical injuries, and on the other hand, general surgeons encountering eye injuries in wartime should have knowledge of the traumatology of the organ of vision and the anatomical and physiological features of the human eyeball, as highlighted in this article. Additionally, we analyzed the current state of experimental model of blast-induced trauma. We did not analyze all the features of post-traumatic injuries to the eye socket structures after an explosive wave, as these questions will be addressed in future works.

Key words: experimental models, explosive wave, eyeball, orbit, neurotrauma, post-traumatic injuries, anatomy.

Відомості про авторів:

Абдул-Огли Лариса Володимирівна – доктор медичних наук, професор, професор кафедри анатомії людини, клінічної анатомії та оперативної хірургії Дніпровського державного медичного університету, м. Дніпро, <https://orcid.org/0000-0002-6942-2397>;

Олійник Катерина Анатоліївна – аспірант кафедри анатомії людини, клінічної анатомії та оперативної хірургії Дніпровського державного медичного університету, м. Дніпро, <https://orcid.org/0009-0002-4874-5741>.

Information about the authors:

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

Oliinyk Kateryna A. – Graduate student of the Department of Human Anatomy, Clinical Anatomy and Operative Surgery of the Dnipro State Medical University, Dnipro, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-4874-5741>.

Надійшла 26.05.2025 р.