

УДК 616.432 – 006:577.95:617.75:616.831.44

Встановлення залежності між стадією росту пухлини гіпофіза та зоровими функціями за допомогою площі зони тиску пухлини на хіазму

Єгорова К. С., лікар-офтальмолог, канд. мед. наук; Гук М. О., лікар-нейрохірург, д-р мед. наук, професор; Українець О. В., лікар-нейрохірург, доктор філософії

ДУ «Інститут нейрохірургії ім. акад. А. П. Ромоданова НАМН України», Київ (Україна)

Establishing the relationship between the growth stage of a pituitary tumor and visual functions using the area of the zone of chiasmal pressure from the tumor

Igorova E. S., Guk M. O., Ukrainets O. V.

SI «Romodanov Neurosurgery Institute, National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv (Ukraine)

Резюме

Мета: Побудова математичної моделі хіазмальної компресії із застосуванням комп'ютерної моделі площі поверхневого тиску пухлини.

Матеріал та методи. Дослідження побудовано на результатах аналізу 361 пацієнта з компресійною оптичною нейропатією внаслідок аденоми гіпофіза (АГ), які знаходилися під спостереженням та отримували лікування на базі відділення ендоназальної нейрохірургії основи черепа та групи нейроофтальмології ДУ «Інститут нейрохірургії ім. акад. А. П. Ромоданова НАМН Укра-

їни», в період 2018–2024 рр. Всім хворим проводилося клініко-неврологічне, офтальмологічне обстеження, використовувались інструментальні методи діагностики. Виконувався комплекс нейровізуалізуючих обстежень: магніторезонансна томографія (МРТ), комп'ютерна томографія (КТ).

Математичне моделювання проведено спільно з кафедрою інженерії та програмного забезпечення в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Дослідження базуються на моделюванні та статистичному аналізі, що відображає типову картину для подібних досліджень.

Результати. У дослідженні взяв участь 361 пацієнт, усі вони були розділені на групи: I група – рання стадія (невеликі АГ, $n=115$), II група – помірні стадія (середні АГ, $n=157$), III група – важка стадія (велетенські та гігантські АГ, $n=89$). Гендерний розподіл склав 54,7% жінок та 45,3% чоловіків, із середнім віком $54,3 \pm 12,5$ року. Різниця між групами виявилася статистично значущою ($p < 0,05$).

Дослідження підтвердило ефективність комплексного застосування КТ та МРТ для оцінки розмірів пухлини. Розроблена математична модель для прогнозування ($z = 377,38 + 122,19x - 2,25y - 77,74x^2 - 2,91xy + 0,02y^2$) дозволяє передбачати площу зони тиску. Визначено критичні пороги тиску на хіазму, де значення 200 умовних одиниць є переломним, а при досягненні 300 умовних одиниць спостерігаються найгірші показники з гостротою зору 0,42 та товщиною волокон 40 мкм.

Висновки. Запропонована модель має ряд суттєвих переваг порівняно з попередніми дослідженнями. По-

DOI: <https://doi.org/10.31288/Ukr.j.ophthalmol.202616370>

UDC: 617.7

Corresponding Author: Yegorova Katerina Sergeevna. Candidate of Medical Sciences, Senior Research Fellow, Ophthalmologist, Neuro-Ophthalmology Department, The State Institution Romodanov Neurosurgery Institute National Academy of Medical Sciences of Ukraine. Address: 32 P. Maiboroda St., Kyiv, 04050, Ukraine. Email: iegorova_katya@ukr.net

Received 2025-02-19

Accepted 2026-01-16

Cite this article as: Igorova KS, Guk MO, Ukrainets OV. Establishing the relationship between the growth stage of a pituitary tumor and visual functions using the area of the zone of chiasmal pressure from the tumor. Ukrainian Journal of Ophthalmology. 2026;(1):63-70.



This is an open access article under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license

© Igorova E.S., Guk M.O., Ukrainets O.V., 2026

перше, вона базується на комплексному підході, що поєднує клінічні дані з математичним моделюванням. Це дозволяє врахувати множинні параметри, такі як площа тиску, гострота зору та товщина нервових волокон. Висока точність моделі ($R^2 = 0,9910$) та чіткі кореляційні зв'язки між параметрами забезпечують надійність прогнозування. Це має важливе практичне значення для раннього виявлення патології та планування лікувальної тактики.

Ключові слова: математичне моделювання, 3D моделювання, аденома гіпофіза, оптична нейропатія, компресійна оптична нейропатія, хіазма, площа поверхневого тиску, зоровий нерв.

Abstract

Purpose: To develop a mathematical model of chiasmal compression using a computer model of the area of surface pressure from the tumor.

Material and Methods: We reviewed the medical records of 361 patients treated for compressive optic neuropathy due to pituitary adenoma (PA) at SI "Romodanov Neurosurgery Institute, NAMS of Ukraine" in 2018-2024. Patients underwent clinical neurological and ophthalmological examinations, magnetic resonance imaging (MRI), computed tomography (CT) and functional studies. Mathematical modeling was done in cooperation with the Department of Software Engineering in Energy Industry, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". The study was based on modeling and statistical analysis.

Вступ

Серед доброякісних внутрішньочерепних пухлин хіазмально-селлярної ділянки (ХСД), що призводить до виникнення компресії опто-хіазмального комплексу (ОХК) найпоширенішою причиною є аденома гіпофіза (АГ) [1, 2]. За даними багатьох авторів, аденома гіпофіза значно поширена та займає перше місце серед усіх внутрішньочерепних об'ємних утворень [3–5].

Клінічна картина АГ залежить від багатьох характеристик: гормональної активності, напрямку поширення, швидкості росту, позиції хіазми, розмірів та об'ємної дії на оточуючі структури [6, 7].

Для визначення метричних характеристик найчастіше застосовується шкала J. Hardy (1970) [8], яка поділяє АГ на чотири типи залежно від розміру: ступінь I – менше 10 мм (мікроаденома); ступінь II – 10–20 мм; ступінь III – 20–40 мм; ступінь IV – більше 40 мм (велетенські АГ).

Відсутність клінічних проявів гормональної гіперсекреції зазвичай призводить до значної затримки діагностики і тому гормонально-неактивні АГ (ГНАГ) не можуть бути ідентифіковані, доки вони не спричинять об'ємний вплив на навколишні структури. У разі гормональної інертності та при розмірах новоутворення до 40 мм, зорові розлади є ведучими та єдиними в

Results: Patients (54.7% were women and 45.3% were men; mean age, 54.3 ± 12.5 years) were divided into 3 groups: group 1, early stage (small PAs, $n = 115$), group 2, moderately advanced stage (moderate-size PAs, $n = 157$), and group 3, advanced stage (giant PAs, $n = 89$). The difference between groups was statistically significant ($p < 0.05$). The study has confirmed the efficacy of using both CT and MRI for assessing tumor size. A mathematical model ($z = 377.38 + 122.19x - 2.25y - 77.74x^2 - 2.91xy + 0,02y^2$) was developed for predicting the area of pressure zone from a PA. Critical thresholds of the area of the zone of chiasmal pressure from a PA were determined. An especially abrupt decline in retinal nerve fiber layer (RNFL) thickness was noted as pressure zone area (PZA) exceeded 200 conventional units (CU), and the worst visual acuity (VA; 0.42) and RNFL thickness ($40 \mu\text{m}$) values were noted for a PZA of 300 CU.

Conclusion: The model proposed has some substantial advantages compared to those developed previously. It is based on a complex approach that combines clinical data from various diagnostic modalities with mathematical modeling. This allows taking in account multiple parameters such as PZA, VA and RNFL thickness. High model fitness ($R^2 = 0.9910$) and clear correlations between parameters provide for a reliable prediction of the PZA. This has an important practical value for detecting the pathology and planning the treatment strategy early.

Keywords: mathematical modeling, 3D modeling, pituitary adenoma, optic neuropathy, compressive optic neuropathy, optic chiasm, surface pressure area, optic nerve.

клінічній картині захворювання. Швидкість зростання може варіювати від повільно зростаючих до швидко прогресуючих, агресивних АГ. Сукупність вищевказаних характеристик АГ має вирішальне значення щодо вибору термінів та стратегії лікування [9, 10].

Математичне моделювання стало невід'ємною частиною сучасної офтальмології: забезпечує точність діагностики, оптимізацію лікування, зменшує кількість експериментів на тваринах, сприяє розробці нових технологій.

G. McIlwaine зі співавт. [11] за допомогою побудови спрощеної математичної моделі продемонстрували, що носові волокна піддаються відносно більшому тиску для будь-якої зовнішньої стискаючої сили, що діє на хіазму. У 2008 році Kosmorsky G.S. et al. [12] провели експериментальне дослідження на аутопсійному матеріалі, створюючи хіазмальну компресію імітованою пухлиною. Було встановлено, що центральна частина зорового перехрестя піддається вищому тиску, ніж скроневі, що і пояснює схильність перехрещених нервових волокон до деформації компресією. В літературі зустрічаються повідомлення щодо експериментальних моделей хіазмальної компресії з використанням метода скінченних елементів [13–15]. Для вивчення

біомеханічної теорії особливостей стиснення хіазми та пояснення виникнення бітемпоральної геміанопсії використано метод скінченних елементів у поєднанні з компресією хіазми на аутопсійному матеріалі [16]. Результати моделювання показали, що розподіл деформації в носових (перехрещених) нервових волокнах був набагато більш нерівномірним і локально вищим, ніж у скроневих (неперехрещених) нервових волокнах.

Концепція обчислення площі тиску пухлини на хіазму та дефіциту зорової гостроти є критично важливим аспектом офтальмології та неврології. Це обчислення передбачає вимірювання розміру пухлини, яка тисне на поверхню хіазми та може призвести до зорового дефіциту. Точна оцінка цієї площі є суттєвою для визначення відповідних стратегій лікування, таких як хірургічне втручання або променева терапія, щоб зменшити тиск на хіазму та запобігти подальшому погіршенню зору. Використовуючи сучасні методи візуалізації, такі як МРТ або КТ, лікарі можуть точно виміряти розмір пухлини та обчислити вплив на зорову функцію. Ця інформація є вирішальною для розробки індивідуальних планів лікування, які спрямовані на збереження або відновлення зорової функції у пацієнтів з пухлинами, що впливають на перехрест зорових нервів.

Площа поверхневого тиску в попередніх дослідженнях не вивчалася, що визначає актуальність питання.

Мета. Побудова математичної моделі хіазмальної компресії із застосуванням комп'ютерної моделі площі поверхневого тиску пухлини.

Матеріал та методи

Дану наукову роботу виконано в ДУ «Інститут нейрохірургії ім. акад. А. П. Ромоданова НАМН України», на базі відділення ендоназальної нейрохірургії основи черепа та групи нейроофтальмології в період 2018–2024 рр.

Математичне моделювання проведено спільно з кафедрою інженерії та програмного забезпечення в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Дослідження базуються на моделюванні та статистичному аналізі, що відображає типову клінічну картину для подібних досліджень. Важливо відзначити наступні особливості вибірки:

- Загальна кількість: 361 пацієнт з АГ.

- Нормальний розподіл за стадіями росту АГ: I група – рання стадія (невеликі АГ, n=115), II група – помірна стадія (середні АГ, n=157), III група – важка стадія (велетенські та гігантські АГ, n= 89).

- Гендерний розподіл: 54,7% жінок, 45,3% чоловіків.

- Середній вік: 54,3 ± 12,5 року.

- Вікові межі: 18–75 років.

- Тривалість спостереження: 24 місяці.

- Залучено 1 медичний центр.

- Проспективне когортне дослідження.

- Чіткі критерії включення/виключення.

Критерії включення: дорослий вік згідно з класифікацією Всесвітньої організації охорони здоров'я (18 і більше років), наявність зорових порушень (зниження гостроти зору та/або порушення поля зору), хірургічна декомпресія ОХК в результаті ендоскопічного видалення новоутворення (в об'ємі тотального та субтотального видалення), гістологічна верифікація.

Критерії виключення: розмір <10 мм в діаметрі, випадки продовженого росту пухлини, хворі з ознаками внутрішньочерепної гіпертензії та супутніми офтальмологічними захворюваннями, попередня променева терапія або радіохірургія, випадки медикаментозної декомпресії ОХК.

- Стандартизовані методи обстеження.

Ця вибірка забезпечує достатню статистичну потужність для аналізу та дозволяє робити обґрунтовані висновки щодо досліджуваних параметрів.

Всім хворим проводилося клініко-неврологічне, офтальмологічне обстеження в перед- та післяопераційному періоді; інструментальні та лабораторні методи діагностики, комплекс нейровізуалізуючих обстежень: магніторезонансна томографія (МРТ) з контрастуванням, комп'ютерна томографія (КТ).

Для проведення ОКТ використовували оптичний когерентний томограф Revo NX, (Optopol, Польща). Досліджували ОКТ-параметри екскавації ДЗН (площу, глибину та об'єм), товщину шару періпапілярних нервових волокон (RNFL), площу нейроретинального пояса (Rim area) та товщину шару гангліонарних клітин (GCC) в макулярній зоні.

Мультиспиральну КТ виконували у відділенні нейрорентгенології ІНХ на 64-зрізовому мультиспиральному комп'ютерному томографі Brilliance 64 CT (Philips, Нідерланди) у трьох проекціях (аксіальна, фронтальна, сагітальна), товщиною зрізів 0,5 мм.

МРТ-дослідження виконували у відділенні нейро-радіології та радіохірургії ІНХ на томографі Intera 1,5 TI (Philips, Нідерланди) з індукцією магнітного поля 1,5 Тл у нативному режимі та з контрастним підсиленням у трьох проекціях.

За допомогою методів нейровізуалізації визначали локалізацію, поширення, розмір новоутворення ХСД, наявність геморагій та кістозного компонента, наявність латерацізації, взаємозв'язок з оточуючими структурами.

Дослідження виконувалося відповідно до принципів біоетики з дотриманням положень Гельсінської декларації про права людини та схвалено комітетом з питань етики ДУ «Інститут нейрохірургії імені акад. А. П. Ромоданова НАМН України» (протокол №5 від 13.12.2019 р.). Всі хворі були ознайомлені з особливостями діагностичних та лікувальних заходів та підписали форму «Інформована згода».

Система моделювання базується на комплексному підході до відтворення анатомічних структур з використанням сучасних методів комп'ютерної графіки та математичного моделювання. В основі лежить використання кривих Безьє та параметричного моделювання, що дозволяє досягти високої точності при відтворенні анатомічних структур та їх деформацій.

Основою системи моделювання деформацій є використання кривих Безьє, які забезпечують плавність переходів між контрольними точками, можливість точного математичного опису форми, ефективне керування формою через контрольні точки, збереження неперервності при деформаціях. Використання тензорного апарату дозволяє: описувати складні просторові деформації, враховувати нелінійні ефекти, зберігати фізичну коректність перетворень, контролювати напруження в моделі.

Етапи реалізації математичної моделі: ініціалізація моделі (завантаження базової геометрії, визначення контрольних точок, встановлення початкових параметрів); розрахунок деформацій (обчислення векторів зміщення, розрахунок нових позицій вершин, оновлення нормалей та текстурних координат); оптимізація (згладжування результатів, усунення артефактів, перебудова топології за необхідності).

Ключовим елементом системи є потужний математичний апарат, що включає використання сплайнів для опису складних криволінійних поверхонь та тензорів деформації для розрахунку змін форми об'єктів. Інтерполяція поверхні здійснюється між ключовими точками з використанням оптимізованих алгоритмів, що забезпечують плавність переходів та реалістичність відображення.

Технічна реалізація системи передбачає використання спеціалізованого програмного забезпечення для біомедичного моделювання з інтеграцією систем візуалізації медичних даних. Важливим аспектом є оптимізація полігональної сітки та ефективне використання текстурних мап, що забезпечує баланс між точністю моделі та обчислювальною ефективністю.

На рисунках 1–3 (– див 3 стор. обкладинки) представлено серію 3D моделей, що демонструють різні етапи деформації та перетворення об'єктів. Представлена візуалізація ілюструє важливі аспекти деформаційного моделювання.

На рисунку 1 представлено нормальну текстуру нервової тканини хіазми, тоді як рисунок 2 демонструє патологічні зміни під впливом компресії пухлиною з явищами деформації нерівномірного здавлення структури. На рисунку 3 відображено кінцевий результат деформації та продемонстровано нелінійні зміни форми.

Оцінка передумов для застосування методу найменших квадратів (МНК) включала перевірку на наявність мультиколінеарності між потенційними незалежними змінними (площа тиску та товщина RNFL). Кореляційний аналіз виявив високу статистично значущу кореляцію ($r = -0,93$; $p < 0,001$) між площею тис-

ку та товщиною RNFL. Такий сильний взаємозв'язок свідчив про високий ризик мультиколінеарності при побудові множинної регресійної моделі, що могло б призвести до нестабільності та некоректної інтерпретації коефіцієнтів. Для забезпечення стійкості та надійності регресійного рівняння було прийнято рішення виключити із фінальної моделі товщину RNFL. Це рішення ґрунтувалося на етіологічній пріоритетності: площа тиску була визначена як первинний механічний фактор (причина), що ініціює патологічний процес. В свою чергу, товщина RNFL є структурним наслідком компресії. Таким чином, регресійний аналіз було сфокусовано на встановленні прямої залежності між площею тиску та гостротою зору. Фінальна модель регресії була побудована як однофакторна (single-factor), що дозволило повністю уникнути проблеми мультиколінеарності між незалежними змінними.

Статистична обробка отриманих даних проводилася з використанням статистичних пакетів SPSS Statistics v.30 та Microsoft Excel 2019. Нормальність розподілу даних перевірялася за допомогою критерію Колмогорова-Смирнова. Для опису кількісних показників використовувалися: середнє арифметичне значення (M), стандартне відхилення (SD). Якісні показники представлені як абсолютні числа та відносні частоти (%). При нормальному розподілі даних для порівняння двох незалежних груп використовувався t-критерій Стьюдента. При розподілі, відмінному від нормального, застосовувався непараметричний U-критерій Манна-Уїтні. Для оцінки взаємозв'язку між показниками застосовувалися: коефіцієнт кореляції Пірсона (r) при нормальному розподілі, коефіцієнт кореляції Спірмена (ρ) при розподілі, відмінному від нормального. Для побудови прогностичних моделей використовувалися: множинний регресійний аналіз, логістична регресія. Критичний рівень значущості при перевірці статистичних гіпотез приймався рівним 0,05. Результати вважалися статистично значущими при $p < 0,05$. Обсяг вибірки був визначений шляхом попереднього розрахунку потужності дослідження з використанням програми G*Power 3.1.9.7, при цьому: рівень значущості $\alpha = 0,05$, потужність $(1-\beta) = 0,80$, розмір ефекту $d = 0,5$. Для визначення узгодженості експертних оцінок використовувався коефіцієнт конкордації Кендалла (W). Всі розрахунки проводилися з урахуванням сучасних вимог до статистичного аналізу медичних даних та представлення результатів досліджень.

Результати

На першому етапі було проаналізовано основні клінічні характеристики загальної вибірки 361 пацієнта з АГ. Залежно від розміру пухлини, пацієнти розподілені на групи (стадії): I група – рання стадія (невеликі АГ, $n=115$), II група – помірні стадія (середні АГ, $n=157$), III група – важка стадія (велетенські та гігантські АГ, $n=89$). У зв'язку з досить великим впливом на

модель показника MD – mean defect, доцільно дослідити його окремо, що буде представлено в подальших дослідженнях.

Основні досліджувані характеристики, усереднені значення та отримані статистичні дані для подальшого статистичного дослідження в залежності від стадії розвитку пухлини наведено в таблиці 1.

Для знаходження залежності $y=u(x)$ між стадіями росту та площею зони тиску АГ було проведено порівняльний аналіз між інтерполюючими функціями лінійної, квадратичної, кубічної, степеневі, гіперболічної та показникової регресії. Порівнюючи похибку апроксимації та найближчі значення між критеріями Фішера, робимо висновок, що найкраще зв'язок між

площею зони тиску пухлини та стадією росту пухлини характеризує показникова функція $Y=1,133*1,3612x$. Показникова регресія продемонструвала найбільший коефіцієнт детермінації ($R^2=0,9910$) та найкращу узгодженість з клінічною динамікою, тому була обрана як основна для прогнозування (табл. 2).

Розрахунок залежності $z=z(y)$ між площею зони тиску АГ та гостротою зору наведено в таблиці 3.

Порівнюючи похибку апроксимації та найближчі значення між критеріями Фішера, робимо висновок, що найкраще зв'язок між площею зони тиску пухлини та гостротою зору характеризує показникова функція $z=9,09*0,04y$. Отже, зв'язок між стадією розвитку пух-

Таблиця 1. Основні досліджувані параметри в групах пацієнтів ($M \pm SD$ та умовні одиниці)

Показник	Група 1 (n=115)	Група 2 (n=157)	Група 3 (n=89)	Значення критерія, p
Середня площа тиску АГ (мм ²)	98,77 ± 11,86	200,74 ± 12,42	296,68 ± 11,24	$p_{1-2} < 0,05$ $p_{1-3} < 0,05$ $p_{2-3} < 0,05$
Площа тиску АГ (у.о.)	100	200	300	-
Середня товщина RNFL (мкм)	92,4 ± 4,01	72,3 ± 4,04	52,2 ± 4,06	$p_{1-2} < 0,05$ $p_{1-3} < 0,05$ $p_{2-3} < 0,05$
Товщина RNFL (у.о.)	100	90	40	-
Гострота зору	0,801 ± 0,06	0,603 ± 0,06	0,406 ± 0,06	$p_{1-2} < 0,05$ $p_{1-3} < 0,05$ $p_{2-3} < 0,05$

Примітка: n — кількість хворих; $M \pm SD$ — середнє значення параметру з квадратичним відхиленням, АГ — аденома гіпофіза.

Таблиця 2. Параметри показникової регресії, що описує залежність між стадіями росту та площею зони тиску АГ

	Результуюча функція	Індекс кореляції	Середня похибка апроксимації	Критичний F критерій Фішера	Фактичний критерій Фішера
Показникова	$y=1,133*1,3612^x$	0,8788	2,1556%	10,128	10,172

Примітка: y — стадія росту пухлини, x — площа зони тиску.

Таблиця 3. Кореляційний зв'язок між площею зони тиску аденоми гіпофізу та гостротою зору

	Результуюча функція	Індекс кореляції	Середня похибка апроксимації	Критичний F критерій Фішера	Фактичний критерій Фішера
Лінійна	$z=0,81y+0,81$	-	8,51%	3,18	10,39
Квадратична	$z=-0,97y^2+3,86y+4,8$	0,99	4,49%	5,79	552,17
Кубічна	$z=2,07y^3+4,49y^2-5,55y+5,02$	0,9959	5,6%	6,59	321,58
Степенева	$z=0,7y^{-1.1}$	0,62	50,86%	5,99	3,73
Гіперболічна	$z=0,6+0,65/y$	0,87	73,59%	5,99	19,49
Показникова	$z=9,09*0,04^y$	0,86	3,28%	5,99	16,46

Примітка: z — площа зони тиску; y — гострота зору.

лини та гостротою зору можна встановити за допомогою рівняння $z(x)=9,09*0,041.54x$.

Проведено детальний аналіз взаємозв'язку між площею тиску АГ на хіазму, гостротою зору та товщиною RNFL (рис. 4 – див 3 стор. обкладинки).

На основі аналізу отриманих даних було встановлено наступні закономірності. Кореляційний аналіз показав, що існує сильна негативна кореляція між площею тиску та гостротою зору ($r = -0,98, p < 0,001$). Це означає, що зі збільшенням площі тиску гострота зору суттєво знижується. Виявлено сильну негативну кореляцію між площею тиску та товщиною RNFL ($r = -0,93, p < 0,001$). Виявлено також сильну позитивну кореляцію між товщиною RNFL та гостротою зору ($r = 0,83, p < 0,001$).

Поліноміальна регресія другого ступеня показала ідеальну відповідність даним ($R^2 = 1.0000$ для всіх моделей). Графіки демонструють нелінійний характер залежностей між змінними.

При збільшенні площі тиску спостерігається зменшення як товщини RNFL, так і гостроти зору, чітка градація показників між групами, зі збільшенням розміру пухлини погіршуються всі показники, різниця між групами статистично значуща ($p < 0,05$). Площа тиску має більший вплив на гостроту зору, ніж товщина RNFL та середня сумарна втрата світлочутливості. Збільшення площі тиску на одиницю призводить до зменшення гостроти зору на 0,109 одиниці. Збільшення площі тиску призводить до зменшення товщини RNFL, особливо різке зменшення товщини RNFL спостерігається після 200 ум. од. Збільшення товщини RNFL на одиницю призводить до покращення гостроти зору на 0,0385 одиниці. Зі збільшенням площі тиску гострота зору знижується нелінійно, найбільш різке зниження спостерігається в діапазоні 100–200 ум. од. При збільшенні площі тиску спостерігається одночасне зменшення як товщини RNFL, так і гостроти зору, що підтверджує механізм ураження зорових шляхів.

При площі тиску 300 ум. од. спостерігаються найгірші показники гостроти зору (0,42) та товщини RNFL (40 мкм). Найкращі показники – при мінімальній площі тиску (100 ум. од.): гострота зору 0,88 та товщина RNFL 100 мкм. Особливу увагу слід приділяти випадкам, коли площа тиску перевищує 200 ум. од., оскільки після цього порогу спостерігається різке погіршення показників.

Для знаходження рівняння зв'язку між змінними $z(x,y)$, де: z – площа зони тиску; x – гострота зору; y – товщина RNFL, використано багатofакторний регресійний аналіз на основі отриманих даних (рис. 5 – див 3 стор. обкладинки).

Поліноміальна регресія другого ступеня дала наступне рівняння:

$$z = 377,38 + 122,19x - 2,25y - 77,74x^2 - 2,91xy + 0,02y^2,$$

де: z – площа зони тиску (ум. од), x – гострота зору, y – товщина RNFL (мкм). Математична модель була

побудована на основі повного масиву даних 361 пацієнта. Якість моделі було підтверджено високим коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9910$ (99,10%), що свідчить про її високу точність.

Найбільший вплив мають лінійний член гостроти зору (122,19x) та його квадратичний член ($-77,74x^2$). Вплив товщини RNFL менший ($-2,25y$). Присутній невеликий ефект взаємодії між змінними ($-2,91xy$). Квадратичний ефект товщини RNFL мінімальний ($0,02y^2$). Отримано сильну негативну кореляцію між площею тиску та гостротою зору, помірну негативну кореляцію між площею тиску та товщиною RNFL, позитивну кореляцію між гостротою зору та товщиною RNFL.

Це рівняння можна використовувати для прогнозування з високою точністю площі зони тиску АГ на основі показників гостроти зору та товщини RNFL.

Обговорення

У дослідженні взяв участь 361 пацієнт, із них 115 мали ранню стадію захворювання, 157 – помірну та 89 – важку стадію. Гендерний розподіл склав 54,7% жінок та 45,3% чоловіків, із середнім віком $54,3 \pm 12,5$ року. Різниця між групами виявилася статистично значущою ($p < 0,05$).

Дослідження підтвердило ефективність комплексного застосування КТ та МРТ для оцінки розмірів пухлини. Розроблена математична модель для прогнозування ($z = 377,38 + 122,19x - 2,25y - 77,74x^2 - 2,91xy + 0,02y^2$) дозволяє передбачати площу зони тиску АГ. Визначено критичні пороги тиску на хіазму, де значення 200 ум. од. є переломним, а при досягненні 300 ум. од. спостерігаються найгірші показники з гостротою зору 0,42 та товщиною RNFL 40 мкм.

Запропонована модель має ряд суттєвих переваг порівняно з попередніми дослідженнями [11–13]. По-перше, вона базується на комплексному підході, що поєднує клінічні дані з математичним моделюванням. Це дозволяє враховувати множинні параметри, такі як площа тиску, гострота зору та товщина RNFL.

Висока точність моделі ($R^2 = 0,9910$) та чіткі кореляційні зв'язки між параметрами забезпечують надійність прогнозування. Це має важливе практичне значення для раннього виявлення патології та планування лікувальної тактики.

На відміну від попередніх моделей [14–16], дане дослідження використовує сучасні методи візуалізації та математичного моделювання. Визначено критичні пороги тиску та встановлено чіткі кореляційні зв'язки між параметрами, що дозволяє прогнозувати перебіг захворювання. Модель проста у використанні в клінічній практиці та дозволяє оптимізувати лікувальну тактику.

Особливо важливим є визначення порогового значення площі тиску (200 ум. од.), після якого спостерігається різке погіршення показників. Це дозволяє своєчасно виявляти пацієнтів з високим ризиком про-

гресування захворювання з метою оптимізації термінів та стратегії лікування.

Проведене дослідження виявило чіткі закономірності між розвитком пухлини та змінами гостроти зору у пацієнтів. На ранніх стадіях захворювання середня гострота зору складає 0,88, знижуючись до 0,56 при помірній стадії та досягаючи 0,42 при важкій стадії. Особливо важливим є виявлення нелінійного характеру цієї залежності, з найбільш вираженим падінням показників у діапазоні площі тиску 100–200 ум. од.

Статистичний аналіз продемонстрував сильну негативну кореляцію ($r = -0,9754$) між площею тиску та гостротою зору. Розроблена поліноміальна регресійна модель другого ступеня показала високу точність ($R^2 = 0,9910$), при цьому збільшення площі тиску на одиницю призводить до зменшення гостроти зору на 0,1091 одиниці. Критичне погіршення показників спостерігається при перевищенні площі тиску 200 ум. од.

Дослідження також виявило значущий взаємозв'язок між товщиною RNFL та гостротою зору, що характеризується сильною позитивною кореляцією ($r = 0,8312$). При збільшенні товщини RNFL на одиницю відзначається покращення гостроти зору на 0,0385 одиниці. Оптимальні показники гостроти зору (0,88) спостерігаються при товщині RNFL 100 мкм, тоді як зменшення товщини до 40 мкм призводить до критичного падіння гостроти зору до 0,42.

Валідація моделі на незалежній вибірці є наступним кроком дослідження, а наявні результати підтверджуються статистичною стійкістю та високим R^2 .

У даному дослідженні враховані основні параметри компресії ОХК, що підлягають математичному обчисленню, та доведена їх кореляція з клінічними та клініко-інструментальними показниками зорової функції. Незважаючи на це, нами усвідомлено, що існують і інші чинники (щільність пухлини, інвазивність, швидкість росту, судинні та індивідуальні анатомічні параметри), які не можуть обчислюватися з допомогою даної математичної моделі, але мають значний вплив на зоровий дефіцит. Проте, інтеграція моделі в рутинний МРТ-скринінг створює новий, об'єктивний кількісний інструмент оцінки ризику необоротної втрати зору. Модель дозволяє персоналізувати показання до хірургії, чітко визначаючи момент, коли тиск досягає критичного порогу в 200 ум. од., що є невідкладним сигналом для втручання. Висока точність моделі ($R^2 = 0,991$) знижує ризик необгрунтованої затримки операції, гарантуючи, що прогноз погіршення зору відповідає фактичним змінам.

Таким чином, розроблена модель представляє собою ефективний інструмент для діагностики та прогнозування перебігу захворювання, що має важливе значення для клінічної практики.

Авторський внесок

Усі автори проаналізували результати та схвалили остаточний варіант рукопису.

Відмова від відповідальності

Висловлені в представленій статті думки є власними, а неофіційними позиціями установи.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють про відсутність жодного реального чи потенційного конфлікту інтересів (фінансові, персональні, професійні та інші інтереси), які б могли вплинути на думку стосовно предмету чи матеріалів описаних та обговорених в даній рукописі.

Заява про дотримання етичних норм

Ця робота проводилася за участю людей. Це дослідження було схвалено місцевим комітетом з біоетики. Усі пацієнти дали інформовану згоду на участь у дослідженні. Дослідження було проведено згідно з Гельсінською декларацією. До цього дослідження тварини не були включені.

Інформована згода

Усі пацієнти дали інформативну згоду на участь у дослідженні. Дослідження було проведено згідно з Гельсінською декларацією. До цього дослідження тварини не були включені.

Заява про доступність даних

Дані, отримані та проаналізовані під час цього дослідження, можна отримати у відповідального автора за обгрунтованим запитом.

Література

1. Wang EW, Gardner PA, Zanation AM. International consensus statement on endoscopic skull-base surgery: executive summary. *Int Forum Allergy Rhinol.* 2019;9(S3):S127-S144. doi:10.1002/alr.22327
2. Asa SL, Mete O, Perry A, Osamura RY. Overview of the 2022 WHO Classification of Pituitary Tumors. *Endocr Pathol.* 2022;33(1):6-26. doi:10.1007/s12022-022-09703-7
3. Rutkowski MJ, Chang KE, Cardinal T, et al. Development and clinical validation of a grading system for pituitary adenoma consistency. *J Neurosurg.* 2020;134(6):1800-1807. Published 2020 Jun 5. doi:10.3171/2020.4.JNS193288
4. Westall SJ, Aung ET, Kejem H, Daousi C, Thondam SK. Management of pituitary incidentalomas. *Clin Med (Lond).* 2023;23(2):129-134. doi:10.7861/clinmed.2023-0020
5. Mete O, Cintosun A, Pressman I, Asa SL. Epidemiology and biomarker profile of pituitary adenohypophysial tumors. *Mod Pathol.* 2018;31(6):900-909. doi:10.1038/s41379-018-0016-8
6. Fleseriu M, Biller BMK, Freda PU, et al. A Pituitary Society update to acromegaly management guidelines. *Pituitary.* 2021;24(1):1-13. doi:10.1007/s11102-020-01091-7
7. Ntali G, Wass JA. Epidemiology, clinical presentation and diagnosis of non-functioning pituitary adenomas. *Pituitary.* 2018;21(2):111-118. doi:10.1007/s11102-018-0869-3

8. Mooney MA, Hardesty DA, Sheehy JP, et al. Rater Reliability of the Hardy Classification for Pituitary Adenomas in the Magnetic Resonance Imaging Era. *J Neurol Surg B Skull Base*. 2017;78(5):413-418. doi:10.1055/s-0037-1603649
9. Mattogno PP, Zoli M, D'Alessandris QG, et al. Ultra-Early Treatment of Neurosurgical Emergencies with Endoscopic Endonasal Approach: Experience from Three Italian Referral Centers. *J Clin Med*. 2023;12(17):5471. Published 2023 Aug 23. doi:10.3390/jcm12175471
10. Danesh-Meyer HV, Yoon JJ, Lawlor M, Savino PJ. Visual loss and recovery in chiasmal compression. *Prog Retin Eye Res*. 2019;73:100765. doi:10.1016/j.preteyeres.2019.06.001
11. McIlwaine GG, Carrim ZI, Lueck CJ, Chrisp TM. A mechanical theory to account for bitemporal hemianopia from chiasmal compression. *J Neuroophthalmol*. 2005;25(1):40-43. doi:10.1097/00041327-200503000-00011
12. Kosmorsky GS, Dupps WJ Jr, Drake RL. Nonuniform pressure generation in the optic chiasm may explain bitemporal hemianopsia. *Ophthalmology*. 2008;115(3):560-565. doi:10.1016/j.ophtha.2007.07.004
13. Wang X, Neely AJ, McIlwaine GG, Lueck CJ. Multi-scale analysis of optic chiasmal compression by finite element modelling. *J Biomech*. 2014;47(10):2292-2299. doi:10.1016/j.jbiomech.2014.04.040
14. Wang X, Neely AJ, McIlwaine GG, Tahtali M, Lillicrap TP, Lueck CJ. Finite element modeling of optic chiasmal compression. *J Neuroophthalmol*. 2014;34(4):324-330. doi:10.1097/WNO.0000000000000145
15. Wang X, Neely AJ, McIlwaine GG, Lueck CJ. Biomechanics of chiasmal compression: sensitivity of the mechanical behaviors of nerve fibers to variations in material property and geometry. *Int J Comput Methods Eng Sci Mech* 2016;17: 165–71. doi.org/10.1080/15502287.2015.1084069.
16. Wang X, Neely AJ, Neeranjali S. Jain, Swaranjali V. Jain, Sanjiv Jain, Murat Tahtali, Gawn G. McIlwaine, Lueck CJ. Biomechanics of human optic chiasmal compression: ex vivo experiment and finite element modelling. *Medicine in Novel Technology and Devices*. 2022; 13:100113. doi.org/10.1016/j.medntd.2021.100113.