

М. СЕРГІЄНКО, В. МОЛЕБНИЙ

## ПАРАДОКСИ ЛЮДСЬКОГО ОКА

*Офтальмологія як наука і як галузь практичної медицини за останні кілька десятиліть вийшла на принципово новий рівень можливостей. Зумовлене це значною мірою тим, що вдалося пояснити роль дрібних оптичних недосконалостей (аберацій) у функціонуванні ока як органу зору і навчитися їх коригувати. Однак, перш ніж виправляти фізіологічні аберації, їх необхідно точно виміряти. Така можливість з'явилася завдяки створенню у Києві в 1996-1998 рр. першого у світі аберометра сучасного типу. Це забезпечило справжній якісний прорив у дослідженні людського ока.*

Ще порівняно недавно дослідження ока за допомогою аберометра тривало 30-40 хвилин. Тепер стало можливим виконувати його за 0,01 секунди з виведенням детальних даних на екран монітора. Такий прогрес вдалося забезпечити передусім завдяки формуванню оновленої концепції рефракції ока, а також створенню унікального приладу для вимірювання аберацій його оптичної системи.

Активний розвиток вчення про оптичну систему людського органу зору розпочався 150 років тому, коли Г. Гельмгольц розробив метод прижиттєвого вимірювання анатомо-оптичних елементів ока і створив теорію акомодатії. До початку ХХ століття дослідники досить детально вивчили різні особливості цієї оптичної системи. Коли порівняли всі одержані дані, з'ясувалося, що не існує двох однакових очей. І тоді виникла ідея створити, так би мовити, усереднену модель людського ока. Для цього використали середні арифметичні показники параметрів рогівки, кришталика тощо. З'явилися різні варіанти моделі оптики людського органу зору — так званих схематичних очей.

Найдосконалішим було визнано схематичне око, запропоноване шведом А. Гульштрандом, який за цю розробку і участь у створенні офтальмологічних приладів був удостоєний у 1911 р. Нобелівської премії (до речі, це єдиний випадок, коли нобелівським лауреатом став офтальмолог). Саме модель А. Гульштранда було покладено в основу низки фізіологічних концепцій. Однак при цьому чомусь нікого не турбувало те, що схематичне око мало ідеальну оптику, яка навряд чи можлива в реальній живій системі. Більше того, існувала думка (навіть серед фахівців), що тільки ідеальна оптична система здатна відтворити всі дивовижні можливості людського ока.

Тим часом нагромаджувалося дедалі більше відомостей про дрібні оптичні недосконалості, властиві кожному нормальному оку. Навіть Гельмгольц знав про існування таких фізіологічних аберацій і якось зауважив, що якби знайшовся майстер, спроможний зробити на замовлення живе око, то він сам не прийняв би свій виріб через низьку його якість.

Серед феноменів, пов'язаних з функціонуванням ока, виявилось чимало таких, які неможливо пояснити навіть сьогодні. Скажімо, чому нормою вважається гострота зору, яка відповідає одиниці? Або яка глибина різкості ока як оптичного приладу? В жодному підручнику ви не знайдете відповіді. Чи візьмемо акомодатію — здатність ока чітко бачити предмети на різній відстані. Відомо, що в людському оці існує лише один

інструмент акомодациі — кришталік. Але відомо, що іноді його доводиться видаляти (приміром, в ході операції з приводу катаракти), і, здавалося б, людина після цього не повинна бачити на різній відстані. Однак вона бачить, хоча й у дещо менших межах. Чому?

Ще одна загадка пов'язана з рогівкою. Ця передня частина оболонки ока є живою тканиною. Якщо вимірювати її приладами, з'ясуємо, що вона крива, астигматична. Причому астигматизм у неї великий — від 0,25 до 1 діоптрії, а зір, тим часом, може бути цілком нормальним. Чому? За однією з гіпотез, кривизна кришталіка спрямована у протилежний, ніж у рогівки, бік, і завдяки цьому відбувається корекція. Але ж це нонсенс! З практики відомо, що їхні кривизни, навпаки, накладаються одна на одну.

І таких невідповідностей багато, з ними ми зустрічаємося буквально щодня. Отож десь у 60-ті роки розгорнувся цілеспрямований пошук нових методів, здатних забезпечити більш точне і надійне вимірювання фізіологічних аберацій ока. І буквально протягом п'яти років були опубліковані праці трьох авторів, які незалежно один від одного, використовуючи різні методи, одержали однакові результати у вимірюванні фізіологічних аберацій людського ока. Перша публікація належала фізику з Москви М.С. Смирнову [1]. Автор другої — теж фізик, американець Г. Ван ден Брінк [2]. Третє дослідження виконав один з авторів цієї статті — М.М. Сергієнко. З'явилася публікація [3], яка фактично була фрагментом докторської дисертації «Дослідження до теорії клінічної рефракції ока», захищеної у 1971 р.

М.С. Смирнов і Г. Ван ден Брінк підійшли до своїх досліджень з позицій фізики і тому не змогли до кінця оцінити їх значення для фізіології ока.

Тим часом аналіз функціонування нашого органу зору в світлі нових уявлень про оптичні аберації дав змогу перебудувати загальну концепцію рефракції ока і пояснити багато феноменів, які не вдавалося зрозуміти, поки головним орієнтиром було ідеальне схематичне око [4, 5].

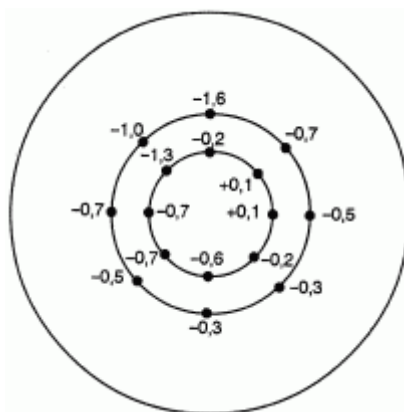


Рис. 1. Рефракція нормального ока в оптичних зонах діаметром 3 і 5 мм: значення зі знаком «-» показують ступені короткозорості, зі знаком «+» — далекозорості

Нові підходи полягали передусім у відмові від деяких уявлень, зумовлених саме цим орієнтиром. Розглянемо рефракцію ока за допомогою схеми (рис. 1). Позначимо колами зону зіниць, а цифрами — рефракцію в окремих точках зіниці. Якщо відштовхуватися від старих уявлень, то в ідеальному оці в усіх точках мали б бути нулі, а, скажімо, у короткозорому — однакові значення короткозорості. Але в нормальному живому оці, як бачимо на рисунку, є зони і короткозорості, і далекозорості, і нульової рефракції, причому «ножиці» рефракції перевищують півтори діоптрії.

Найважливішим наслідком такої неоднорідності є формування заднього фокуса. Згідно з моделлю схематичного ока заломлені промені перетинаються у точковому фокусі (рис. 2, *a*). Що ж до живого ока, то, як з'ясувалося, в ньому промені після заломлення сходяться не у точці, а в досить широкій зоні (рис. 2, *б*). Отже, тут на сітківці не може бути чіткого зображення. Однак міра його розмитості буває різною.

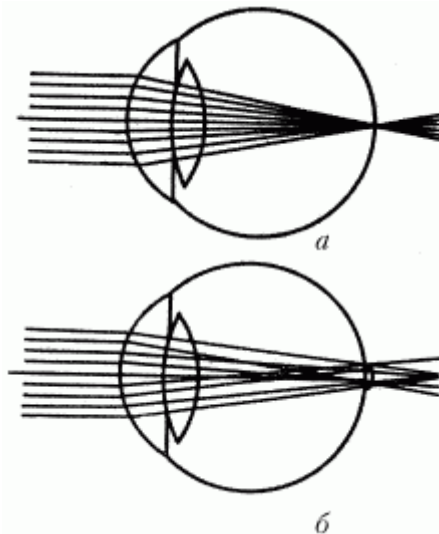


Рис. 2. Хід променів: *a* — у схематичному оці; *б* — у живому оці

Такі висновки далеко не одразу були сприйняті більшістю офтальмологів. Однак поступово стало ясно, що відкриття ролі фізіологічних аберацій дає змогу пояснити чимало тупикових для офтальмології ситуацій. Розглянемо деякі з них.

**Роздільна здатність ока.** Дослідники давно вже шукають відповідь на запитання: який чинник визначає нормальну гостроту зору — 1,0 (60 с у кутовому виразі)? Щоправда, варто уточнити, що середня норма гостроти зору не 1,0, а 1,4 (43 с). Свого часу Г. Гельмгольц висунув гіпотезу, що лімітуючим чинником роздільної здатності ока є діаметр поперечника колбочок сітківки. Підставою для такого припущення був певний збіг кутових розмірів поперечника колбочок і гостроти зору в кутовому виразі. Однак згодом ця гіпотеза була повністю спростована.

Тим часом наші дослідження довели, що існує кореляція між нормальними ступенями гостроти зору (від 1,0 до 2,0) і вираженістю оптичних аберацій (рис. 3). Інакше кажучи, якщо в оці великі фізіологічні аберації, то зір відповідає нижній межі норми (1,0). Чим менші аберації, тим кращий зір. Втім, маємо усвідомлювати, що навіть у тому разі, коли гострота зору дорівнює 2,0, в оці все одно існують аберації.

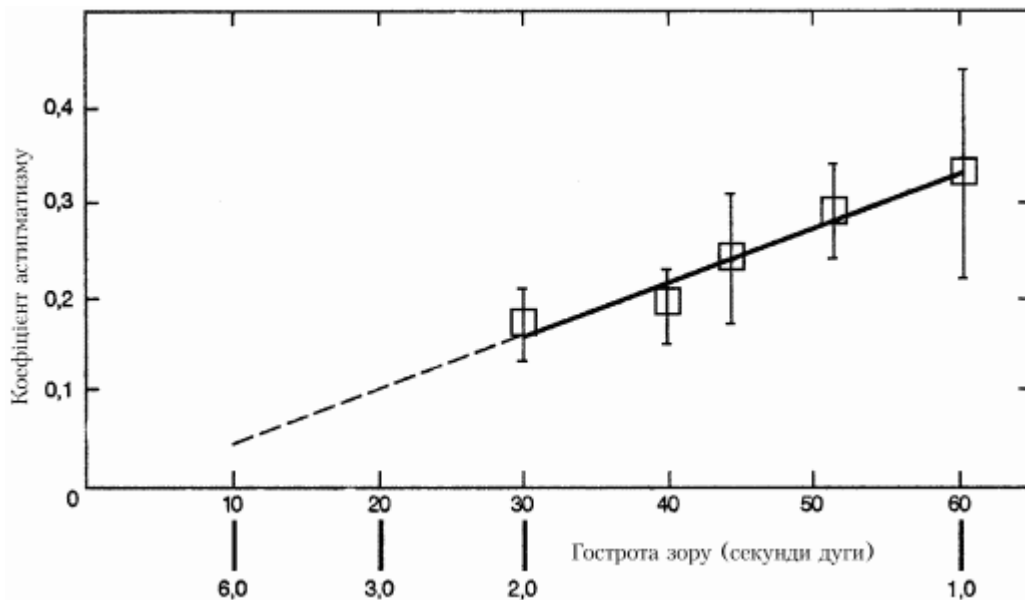


Рис. 3. Залежність між ступенем фізіологічних аберацій та гостротою зору

Отже, нам вдалося довести, що найважливішим чинником, від якого залежить роздільна здатність ока, є якість його оптичної системи.

**Проблема наднормального зору.** Переривчаста лінія на рис. 3 показує, як могла б підвищитися гострота зору, якби внаслідок зменшення (коригування) оптичних аберацій оптика живого ока була доведена до рівня досконалості ідеального схематичного ока Гульштранда. Виявляється, можна досягти показника зору 3,0 і теоретично навіть значно більшого — аж до 8,0. Спочатку більшість офтальмологів поставилася до цієї ідеї як до фантастики. І тільки поступово вона завоювала повсюдне визнання. Більше того, протягом останніх п'яти років у світі почався ажітаж, пов'язаний зі спробами досягти наднормального зору шляхом лазерної корекції оптичних аберацій.

**Глибина фокуса ока.** Будь-який рукотворний оптичний прилад має глибину різкості. Скажімо, фотографи добре знають: чим вужча діафрагма, тим більша глибина різкості, тобто глибина фокуса. Згідно з теорією у схематичному оці глибини фокуса бути не може. Проте наші дослідження довели, що в живому оці вона є. Умови для неї створює формування не точкового, а широкого фокуса (рис. 2, б). Якщо діаметр зіниці дорівнює 3 мм, то глибина фокуса становить 0,9 діоптрії, а коли зіниця має 1 мм у діаметрі або коли людина мружить, то глибина досягає 2,2 діоптрії. Саме ці закономірності пояснюють здатність ока бачити чітко на різні відстані без справжньої акомодатії.

**Афакічна і артіфакічна акомодатія.** Науково доведено, що єдиним інструментом акомодатії, тобто пристосування до бачення предметів на різній відстані, є в людському оці кришталік. Якщо його видалити (а потреба в такій операції, на жаль, виникає досить часто), акомодативна здатність не зникає (хоча з позицій схематичного ока її не повинно бути). При цьому вона точно відповідає глибині фокуса. Протягом ста років природа такої акомодатії (вона має назву афакічної) залишалася загадкою.

Те ж саме стосується і так званого артіфакічного ока. Йдеться про ситуації, коли видалена катаракта заміщується штучним кришталіком, який являє собою жорсткий прозорий матеріал, не здатний змінювати оптичну силу. Та попри це артіфакічне око має акомодативну здатність за рахунок глибини фокуса. Це так звана уявна акомодатія.

**Акомодація у людей похилого віку.** З віком здатність чітко бачити невблаганно зменшується. Приблизно до 60 років вона майже зникає, залишається десь 1,0-1,5 діоптрії. І така акомодативна здатність зберігається у людини до кінця життя. Але чому відбувається неухильне падіння до 60 років, а потім цей процес завмирає? Відповідь шукали у властивостях кришталіка, який, здавалося б, зберігає еластичність. Саме таке пояснення давав професор Б.Л. Радзиховський [6]. Однак переконливих аргументів на користь цього висновку не було. Насправді ж проблема розв'язується сама собою: акомодация у людей похилого віку відповідає глибині фокуса.

**Залишкова акомодация.** Після закапування в око деяких медикаментозних препаратів (мідріатиків), наприклад 1%-го розчину атропіну, обсяг акомодации вже через 40-50 хвилин різко зменшується — з 12,0 до 1,0-1,5 діоптрії. Але не нижче! Це — залишкова акомодация, яка, знову-таки, відповідає глибині фокуса. Тобто спостерігається феномен оптичних абераций, боротися з яким неможливо. Але в СРСР з 50-х років практикувалася атропінізація протягом десяти днів. До неї вдавалися в тих випадках, коли необхідно було максимально зменшити акомодацию. Незважаючи на те, що це давало такий же результат, як і одноразове закапування, використання цього токсичного препарату набуло величезних масштабів. Протягом майже півстоліття були марно витрачені тонни атропіну, сила-силенна людської енергії та коштів. Це стало результатом нерозуміння фізіологічних основ оптичної системи ока. До речі, масова багатоденна атропінізація була суто радянським явищем. В інших країнах до неї вдавалися у виняткових випадках. Сьогодні в Україні теж практично відмовилися від цього методу.

**Загадка контактних лінз.** Як відомо, для оптичної корекції короткозорості найчастіше використовують окуляри або контактні лінзи. Якщо відштовхуватися від моделі схематичного ока, то ефект від окулярних і контактних лінз мав би бути майже однаковим. Переваги останніх не повинні перевищувати 2-4%. На практиці ж спостерігалася неясність: приміром, гострота зору в окулярах дорівнює 0,6, а з контактною лінзою — 1,5. Секрет вдалося розгадати, коли врахували дію оптичних абераций. У разі короткозорості розвиваються мікродеформації рогівки, що збільшує ступінь таких абераций. Окулярні лінзи не можуть їх виправити, а контактні, завдяки безпосередньому приляганню, коригують аберации і підвищують гостроту зору.

Отже, оновлена концепція рефракції ока дала змогу пояснити чимало загадкових, як здавалося раніше, явищ. Розпочалося реформування всієї системи фізіології зорового аналізатора. Однак через інертність мислення воно могло розтягнутися на багато років. Прискорили цей процес успіхи в галузі рефракційної хірургії.

У 80-ті роки з'явилися лазерні методи корекції зору. В 1983 р. у США С. Троkel зі співробітниками вперше зробив операцію з корекції зору за допомогою ексимерного лазера, яка одержала назву фоторефрактивної кератоектомії [7].

Ще через п'ять років у Греції І. Паллікаріс застосував досконаліший метод — LASIK [8], який нині широко використовується в усьому світі. З'явилася можливість коригувати не тільки короткозорість чи далекозорість, а й фізіологічні аберации.

Це стало початком нових уявлень про можливості нашого ока. Відкрилися перспективи досягнення наднормального зору (supernormal vision). Потреба виправляти фізіологічні аберации гостро поставила питання про необхідність їх точного вимірювання. Перший прилад, який забезпечив таку можливість, — аберометр сучасного типу — був створений у Києві в 1996-1998 рр. в Інституті біомедичної техніки та технологій Академії технологічних наук України [9, 10].

Принцип рейтрейсингової aberометрії полягає у послідовному зондуванні ока пацієнта тонким лазерним променем, який вводиться в око паралельно до оптичної осі приладу, покриваючи послідовно у часі всю апертуру ока. Для кожної точки входження в око промінь заломлюється оптичними середовищами ока відповідно до параметрів цих середовищ та границь їх розподілу. За допомогою позиційно чутливого фотоприймача, який «дивиться» в око, для кожної точки входження променя визначають просторове положення проекції променя на сітківці за значеннями, виміряними фотоприймачем. Зі значень функції в окремих точках відновлюють саму функцію на всій вхідній апертурі ока, розв'язуючи систему з кількох сотень рівнянь (сучасний ком-п'ютер на це витрачає частки секунди). Цей унікальний прилад не має собі рівних у світі за всіма основними параметрами. Навесні 1999 року його було продемонстровано у Сіетлі на конгресі американських офтальмологів, що відразу ж викликало величезне зацікавлення фахівців. Київська розробка стала поштовхом для подібних робіт в інших країнах, передусім у США, Німеччині та Японії. І вже у 2001 р. на ринку з'явилися перші комерційні aberометри. На порядку денному — порівняльні випробування вітчизняних та зарубіжних зразків на кафедрі офтальмології Київської медичної академії післядипломної освіти.

Наша вітчизняна новинка постійно вдосконалюється. Зараз ми розробляємо прилад для роздільного вимірювання повної рефракційної похибки оптичної системи ока й одночасно — її рогівкової складової. Це дасть змогу діагностувати окремо рогівкову та кришталикову компоненти і виконувати ряд додаткових фундаментальних досліджень з фізіології зору людини. А тим часом визначаються вже нові перспективи — одержати в сотні разів вищі точності із застосуванням багатопроменевих багаточастотних інтерференційних методів [11].

Отже, зроблено справжній прорив у галузі фізіологічної оптики. Відкрилися нові можливості для корекції зору, розуміння основ функціонування зорового аналізатора і навіть для досягнення наднормального зору.

1. *Смирнов М.С.* Измерение волновой aberрации человеческого глаза // Биоптика. — 1961. — № 6. — С. 687-703.
2. *Van den Brink G.* Measurements of geometrical aberrations of the eye // Vis. research. — 1962. — Vol. 2. — P. 233-244.
3. *Сергиенко Н.М.* К разрешающей способности глаза // Вестн. офтальмол. — 1965. — № 3. — С. 39-44.
4. *Сергиенко Н.М.* Клиническая рефракция человеческого глаза. — К.: Здоров'я, 1975. — 64 с.
5. *Сергиенко Н.М.* Офтальмологическая оптика. — К.: Здоров'я, 1982. — 185 с.
6. *Радзиховский Б.Л.* Старческая дальнозоркость. — Л.: Медицина, 1965. — 159 с.
7. *Trokel S.L., Sprinivasan R., Braren B.* Excimer laser surgery of the cornea // Am. J. Ophthalmol. — 1983. — Vol. 96. — P. 110-115.
8. *Pallikaris I.G., Papatzanaki M., Stathi E. et al.* Laser in situ keratomileusis // Lasers Surg. Med. — 1990. — Vol. 10. — P. 463-468.

9. *Electro-optic inerferometric ssysytem for ophthalmologic investigations. Final Report, STCU project # 418, Molebny V.V., project leader. Inst. Biomed. Engng., Kiev, 1998. — 255 p.*
10. *Molebny V.V., Chyzh I.H., Sokurenko V.M. et al. Retina ray-tracing techique for eye-refraction mapping. Proc. SPIE. — 1997. — Vol. 2971. — P. 175-183.*
11. *Molebny V.V., Smirnov E.M., Ilchenko L.M. et al. Three- beam scanning laser radar microprofilometer. Proc. SPIE. — 1998. — Vol. 3380. — P. 280-283.*
- 

М. Сергієнко, В. Молебний

## ПАРАДОКСИ ЛЮДСЬКОГО ОКА

### Р е з ю м е

Дискутується фізіологічне значення оптичних аберацій людського ока та їх роль у функціонуванні органу зору. Показана можливість досягнення наднормального зору з використанням сучасних методів лазерної корекції оптичних аберацій. Наведено характеристики рейтрейсингового аберометра, розробленого в Україні.

*M. Serhienko, V. Molebny*

## PARADOXES OF HUMAN'S EYE

### S u m m a r y

Physiological role of the optical aberrations in the process of vision is discussed, as well as the possibility of vision correction (up to the normal vision) using modern laser technologies with the reference to ray tracing aberrometer developed in Ukraine.

---

© СЕРГІЄНКО Микола Маркович. Член-кореспондент НАН і АМН України. Головний спеціаліст з офтальмології МОЗ України. Завідувач кафедри офтальмології Київської академії післядипломної освіти ім. П.Л. Шупика (Київ).

МОЛЕБНИЙ Василь Васильович. Доктор технічних наук. Директор Інституту біомедичної техніки та технологій АТН України. Професор кафедри оптики Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Віце-президент Українського оптичного товариства (Київ). 2003.

---