

Chirurgia refrakcyjna rogówki – przegląd technologii laserowych i metod

Corneal refractive surgery – overview of laser technologies and methods

Marcin Smorawski¹, Grzegorz Nawrot², Joanna Wierzbowska^{1,3}



¹ Klinika Okulistyczna Optegra w Warszawie
Dyrektor medyczny: dr n. med. Jolanta Oficjalska

² Klinika Okulistyczna Optegra we Wrocławiu
Dyrektor medyczny: dr n. med. Jolanta Oficjalska

³ Klinika Okulistyki, Wojskowy Instytut Medyczny w Warszawie
Kierownik Kliniki: prof. dr hab. n. med. Marek Rękas

NAJWAŻNIEJSZE

Stosowane obecnie platformy szóstej generacji laserów ekscymerowego i femtosekundowego wspomagane najnowocześniejszymi inteligentnymi i ultraszybkimi systemami kontroli zapewniają wysoką skuteczność i profil bezpieczeństwa we współczesnych laserowych metodach korekcji wad wzroku i stanowią o sukcesie chirurgii refrakcyjnej rogówki XXI w.

HIGHLIGHTS

The latest excimer and femtosecond lasers sixth-generation platforms supported by intelligent and ultra-fast control systems provide both high efficacy and safety profile of modern methods of laser vision correction and contribute the success of corneal refractive surgery in the XXI century.

STRESZCZENIE

Laserowa chirurgia refrakcyjna wykorzystująca technologię lasera ekscymerowego i/lub femtosekundowego jest chirurgią rogówki zmieniającą jej krzywiznę przednią i korygującą w ten sposób wady refrakcji. W artykule przedstawiono po krótko pierwsze techniki refrakcyjne w obrębie rogówki, a następnie charakterystykę technologii laserowych. Ponadto dokonano przeglądu obecnie stosowanych laserowych metod korekcji wad wzroku.

Słowa kluczowe: rogówkowe zabiegi refrakcyjne, laser ekscymerowy, keratektomia fotorefrakcyjna, *laser in situ keratomileusis*

ABSTRACT

Laser refractive surgery, using excimer and/or femto laser technology is surgery of the cornea, correcting refractive errors by changing its anterior curvature. The article presents briefly the first corneal refractive methods, then the characteristics of laser technology and an overview of the currently used methods of laser vision correction.

Key words: refractive surgical procedures, excimer laser, photorefractive keratectomy, *laser in situ keratomileusis*

Nieskorygowane wady refrakcji są obok zaćmy, jaskry i zwyrodnienia plamki związanego z wiekiem jedną z głównych przyczyn osłabienia widzenia i ślepoty na świecie. Badania populacyjne przeprowadzone na różnych kontynentach wskazują, że krótkowzroczność dotyczy 30% populacji w Europie i obu Amerykach, 10% w Afryce i aż 70% w Azji [1]. Od 35% do 55% populacji cierpi też z powodu nadwzroczności i starczowzroczności [2, 3]. Uzyskanie normowzroczności oka jest jednym z wyzwań współczesnej okulistyki i bioinżynierii. Okulary korekcyjne i soczewki kontaktowe stanowią wciąż złoty standard korekcji wad refrakcji, jednak w ostatnich dekadach alternatywą dla tych metod stała się chirurgia refrakcyjna rogówki i soczewki.

Chirurgia refrakcyjna jest jedną z intensywniej rozwijających się dyscyplin okulistyki, obejmuje ona szereg inwazyjnych metod stosowanych w celu zmiany kształtu powierzchni rogówki, a tym samym refrakcji oka. Prekursorów tej dziedziny okulistyki należy szukać w XIX w. (Snellen 1869, Lans 1890, Bates 1894). Odkryto wówczas, że promieniste nacięcia rogówki powodują spłaszczenie jej powierzchni w południku cięcia. Jednak prawdziwy rozwój chirurgii refrakcyjnej rogówki datuje się dopiero od ostatniej ćwierci XX w., od roku 1972, czyli od wprowadzenia metody keratotomii radialnej (RK, *radial keratotomy*) przez S. Fyodorova i V. Durneva [4]. Zabiegi RK najczęściej wykonywano w celu korekcji krótkowzroczności, według nomogramów uwzględniających wiek pacjenta i wielkość wady refrakcji. Metoda ta polega na wykonaniu do 8 paracentalnych, promienistych nacięć rogówki (o głębokości 95–100% grubości rogówki w centrum), z pozostawieniem wolnej strefy centralnej o średnicy co najmniej 3 mm [5]. Fyodorov stworzył także podwaliny pod nowoczesne instrumentarium keratorefrakcyjne, wprowadzając takie narzędzia do chirurgii rogówki, jak: nóż mikrometryczny o diamentowym ostrzu, przyrząd do kalibracji głębokości nacięcia czy markery znakujące rogówkę.

Techniki nacięć rogówki stosowano także do korekcji astygmatyzmu. Obejmowały one:

- keratotomię poprzeczną (TK, *transverse keratotomy*)
- keratotomię łukowatą (AK, *arcuate keratotomy*)
- rąbkowe nacięcia relaksacyjne (LRIs, *limbal relaxing incisions*).

W procedurze TK przeprowadzano nacięcia poprzeczne do stromego południka rogówki, czego następstwem było spłaszczenie rogówki wzdłuż tego południka. W technice AK wykonywano nacięcia łukowate w rejonie środkowego obwodu rogówki w stromym południku. Zabieg LRIs polega na wykonaniu obwodowych nacięć na głębokości ok. 600 μm ku przodowi od rąbka. Techniki AK i LRIs są wciąż stosowane do korekcji

astygmatyzmu po keratoplastyce (AK) i po operacji zaćmy (LRIs).

Prawdziwa rewolucja w chirurgii refrakcyjnej rogówki nastąpiła jednak dopiero w 1983 r. po wprowadzeniu lasera ekscymerowego przez naukowców z Columbia University (USA): S. Trokela i R. Srinivasana. Z tego roku pochodzi też pierwsza praca opisująca precyzję nacięć liniowych i fotoablacji rogówki przy użyciu lasera ekscymerowego na gałkach ocznych małp [6]. Pierwszy udany zabieg korekcji krótkowzroczności na ludzkim oku metodą *corneal shaping* z użyciem lasera ekscymerowego przeprowadziła Marguerite McDonnald w 1989 r. Wkrótce potem laser znalazł zastosowanie w chirurgii refrakcyjnej do korekcji wszystkich wad wzroku, jak również w chirurgii terapeutycznej rogówki (PTK, *phototherapeutic keratectomy*) [7].

Działanie lasera ekscymerowego (*excited dimer* – cząstka/molekuła gazowa pobudzona energią elektryczną) opiera się na pulsowej emisji promieniowania ultrafioletowego, powstałego dzięki połączeniu gazu szlachetnego z halogenem oraz następowemu pobudzeniu przez wyładowanie elektryczne [6]. Modelowanie rogówki przy użyciu lasera ekscymerowego określane jest mianem ablacji fotochemicznej (lub inaczej fotoablacji). Laser ekscymerowy, wykorzystujący falę długości 193 nm (fluoro-argonowy) i bardzo wysoką jednostkową energią impulsu (6,4 eV), doprowadza do wyparowania (ewaporyzacji) ciała stałego z pominięciem pośrednich stanów skupienia i emituje przy tym niewielką ilość energii cieplnej. Każda ekspozycja na światło lasera ekscymerowego usuwa określoną warstwę stromy rogówki, całkowitą liczbę impulsów wyznacza więc głębokość keratektomii. Ilość usuwanej tkanki zależy od wielkości korygowanej wady wzroku i mieści się w przedziale od dziesięciu do stu kilkudziesięciu mikronów. W przypadku krótkowzroczności laser jest centrowany w obrębie strefy optycznej rogówki w celu wywołania spłaszczenia rogówki w centrum. Z kolei korekcja nadwzroczności wiąże się ze ścięciem średniego obwodu rogówki z następowym względnym uwypukleniem części centralnej rogówki. Korekcja astygmatyzmu polega na usunięciu tkanki o 90° od osi astygmatyzmu. Proces ablacji trwa od kilku do kilkudziesięciu sekund. Energia lasera jest dobrze absorbowana przez białka i glikozaminoglikany tworzące strukturę rogówki. Początkowo istniały obawy co do bezpieczeństwa materiału genetycznego komórek po użyciu lasera ultrafioletowego. Liczne badania nie wykazały jednak zagrożenia mutagennego dla zawartego w jądrach komórkowych DNA [8].

Obecnie stosowane platformy laserowe o wysokiej częstotliwości pracy i zastosowaniu małych impulsów promieniowania, tzw. *flying spot lasers*, zapewniają wysoką przewidywalność zabiegu. Tak zwane profilowanie za-

kresu ablacji polega na zaplanowaniu głębokości, szerokości i strefy przejściowej. Konwencjonalne techniki laserowe korygują występujące aberracje niższego rzędu, czyli sferocylindryczny błąd refrakcyjny [9]. Istniejące przedoperacyjnie aberracje wyższego rzędu nie podlegają korekcji według standardowych protokołów ablacji, a nawet mogą ulec zwiększeniu. Może to prowadzić do powstania zaburzeń optycznych, takich jak: efekty olśnienia, efekt halo czy pogorszenie poczucia kontrastu i widzenia nocnego [10].

W odpowiedzi na potrzebę korekcji niepożądanych aberracji wprowadzono na rynek modelowanie kształtu rogówki przy użyciu techniki *wavefront*, czyli spersonalizowane profile zabiegu wykorzystujące analizę czoła fali. Zasada tej techniki opiera się na analizie wszystkich nieregularności układu optycznego oka (z uwzględnieniem rogówki, soczewki, ciała szklistego) i pozwala na zaplanowanie tzw. spersonalizowanego profilu leczenia wady wzroku (*customized ablation*). Procedura refrakcyjna wspomagana techniką *wavefront* uwzględnia istniejące aberracje wyższego rzędu i pozwala na ich usunięcie lub znaczną redukcję. Umożliwia to korekcję nieregularnych wartości astygmatyzmu, zdecentrowanych profili ablacji czy też złożonych aberracji optycznych [11, 12]. Pozwala też na znaczną poprawę wyników pooperacyjnych, na które wpływ ma nie tylko usunięcie wady wzroku, lecz także wzrost komfortu widzenia nocnego i zmierzchowego [13].

Żeby uzyskać najlepsze wyniki refrakcyjne, konieczna jest właściwa konfiguracja oka i układu optycznego lasera. Podczas trwającej od kilku do kilkudziesięciu sekund emisji promieniowania laserowego niezbędne jest utrzymanie fiksacji oka pacjenta; ruchy oka i głowy pacjenta mogą bowiem spowodować powstanie nieregularnych czy zdecentrowanych stref ablacji, odpowiedzialnych za pooperacyjny astygmatyzm czy opisane wyżej niepożądane efekty optyczne [14, 15]. Obecnie na rynku platformy laserowe wyposażone są w urządzenia monitorujące pozycję oka w trakcie zabiegu (*eye-trackers*). System ten, wyposażony w kamery, monitorując pozycję źrenicy i/lub rąbka rogówki, optymalizuje przeniesienie energii lasera na powierzchnię rogówki [16]. Układ ten musi wyprzedzać aplikację wiązki laserowej, reagując na najmniejsze odchylenie gałki ocznej. Im krótszy czas pomiędzy pozyskaniem informacji o położeniu oka a uwolnieniem wiązki laserowej, tym mniejsze ryzyko błędnej aplikacji. Najnowszej generacji turbotrakery o częstotliwości pracy 1050 Hz umożliwiają reakcję w czasie rzędu 3 ms. Najnowocześniejsze platformy ekscymerowe są wyposażone także w inteligentne systemy kontroli termicznej rogówki, zapewniające dynamicznie zoptymalizowaną dystrybucję pulsów lasera w trakcie procedury, uwzględniającą czas niezbędny do ochłodze-

nia ogniska na rogówce i obszaru wokół niego pomiędzy poszczególnymi ekspozycjami. Analizy z wykorzystaniem podczerwonej kamery termograficznej wykazały, że maksymalna zmiana temperatury na powierzchni rogówki w czasie fotoablacji, niezależnie od wielkości wady, jest mniejsza niż 4°C, a jej szczytowa wartość nigdy nie przekracza 35°C. Innymi osiągnięciami technologicznymi, gwarantującymi wysoki profil bezpieczeństwa korekcji laserowej wady wzroku, są automatyczna regulacja oświetlenia, zapewniająca utrzymanie stałej średnicy źrenicy w czasie całej procedury, czy zintegrowany *online* pomiar grubości rogówki w czasie rzeczywistym, przed podniesieniem jej płatka i po podniesieniu, jak również podczas ablacji [17].

Obecnie stosowane platformy szóstej generacji lasera ekscymerowego wykorzystują technologię *flying-spot* o zredukowanej średnicy ogniska (do 0,54–0,68 mm, zmniejszającej ryzyko zaindukowania wtórnych aberracji optycznych), o wysokiej częstotliwości pracy (400–1050 Hz), z krótkim (rzędu kilku sekund) czasem ablacji i wyposażone są w inteligentne systemy kontroli termicznej oraz ultraszybkie układy monitorujące ruch oka pacjenta [18, 19].

LASERY FEMTOSEKUNDOWE

Rogówka i soczewka jako przezroczyste ośrodki optyczne oka nie absorbują promieniowania elektromagnetycznego z zakresu światła widzialnego czy bliskiej podczerwieni. Jednakże przy użyciu energii o wyższych wartościach dochodzi do absorpcji tego zakresu promieniowania, co prowadzi do zmian strukturalnych tkanek. Na tej podstawie narodziła się idea wprowadzenia na rynek okulistyczny technologii, która, wykorzystując wyżej opisane fizyczne właściwości rogówki i soczewki, zrewolucjonizowała i tak już zaawansowane techniki zabiegowe.

Laser femtosekundowy, wprowadzony do chirurgii refrakcyjnej w 2001 r., należy do najnowszej generacji laserów stosowanych w okulistyce. Długość jego fali zawiera się w przedziale 1040–1053 nm, co odpowiada niewidocznej dla ludzkiego oka bliskiej podczerwieni. Urządzenie emituje ultrakrótkie pulsy promieniowania o czasie trwania kilkuset femtosekund (10^{-15} s) i średnicy wiązki 0,001 mm, co zapewnia efektywną i niezwykle precyzyjną pracę bez uszkodzenia otaczających warstw rogówki [20]. Femtolaser wykorzystuje zjawisko tzw. fotodysrupcji i rozwarstwa tkanek rogówki na dokładnie zaprogramowanej głębokości. Proces ten, zwany inaczej fotojonizacją tkanki, prowadzi do jej waporyzacji z wytworzeniem tysięcy drobnych, kawitacyjnych, gazowych pęcherzyków, składających się z dwutlenku węgla i wody [21]. Płaszczyna powstała dzięki temu zjawisku

jest gładka, co zapewnia dobre warunki gojenia i efekty po zabiegu. Towarzysząca zjawisku fala akustyczna szybko się rozprasza, dzięki czemu nie powoduje zagrożenia dla przylegających warstw rogówki.

Pierwszy wprowadzony laser pracował z częstotliwością 15 kHz, natomiast lasery najnowszej generacji, o częstotliwości pracy rzędu 500 kHz, wykonują preparowanie płatką rogówki w ciągu kilkunastu sekund. Zwiększenie częstotliwości pracy pozwoliło zmniejszyć ilość energii dostarczanej do rogówki, a wykorzystywane podczas zabiegu podciśnienie stabilizujące gałkę oczną jest znacznie niższe niż przy użyciu mikrokeratomu, co polepsza profil bezpieczeństwa keratektomii [22]. Procedurami refrakcyjnymi wykorzystującymi technologie femtolasera są:

- femtoLASIK
- FLEx (*femtosecond lenticule extraction*)
- ReLEx (*refractive lenticule extraction*)
- IntraCor (korekcja starczowzroczności)
- nacięcia śródrogówkowe w celu korekcji astygmatyzmu (*intrastromal astigmatism incisions*).

Laser femtosekundowy wykorzystywany jest także w chirurgii transplantacyjnej rogówki, a ponadto przy wszczepianiu pierścieni śródrogówkowych w korekcji krótkowzroczności lub leczeniu stożka rogówki oraz w chirurgii zaćmy. Wspomaga chirurga na takich etapach zabiegu, jak: wykonanie nacięć rogówki, *capsulorhexis* czy fragmentacja jądra soczewki.

METODY

Wśród metod laserowej korekcji wzroku wyróżniamy zabiegi powierzchniowe i głębokie. Zabiegi powierzchniowe polegają na usunięciu nabłonka rogówki i wykonaniu ablacji laserowej na odsłoniętą błonę Bowmana i leżącą pod nią istotę właściwą. Metody te znalazły zastosowanie zwłaszcza w oczach z cieńszą rogówką czy granicznymi wartościami keratometrii oraz u osób z głębokim osadzeniem gałek ocznych, wydatnymi łukami brwiowymi czy uprawiających sporty kontaktowe. Zabiegi powierzchniowe pod względem sposobu usuwania nabłonka rogówki dzieli się na metody:

- chemiczne: PRK (keratektomia fotorefrakcyjna, *photorefractive keratectomy*), LASEK (*laser subepithelial keratomileusis*)
- mechaniczne: EPI-LASIK (*Epi-laser-assisted in situ keratomileusis*), EBK (*Epi-Bowman keratectomy*)
- laserowe: TE-PRK (*transepithelial PRK*).

PRK/LASEK

Keratektomia fotorefrakcyjna (PRK, *photorefractive keratectomy*) jest techniką, w której zdjęcia nabłonka

dokonywane jest po wcześniejszym wystawieniu go przez ok. 20 s na działanie 20% alkoholu etylowego. Strefę deepitelizacji ogranicza się przyciśnięciem do rogówki specjalnym markerem o średnicy 8–9 mm. Odmianą techniki PRK jest metoda LASEK (*laser subepithelial keratomileusis*), wprowadzona w 1999 r., w której nabłonek rogówki w obrębie strefy ablacji zostaje odpreparowany w formie płatka i zaoszczędzony. Ideą zabiegu LASEK było ograniczenie występującego w pierwszych dwóch dobach po zabiegu dyskomfortu (ból i łzawienie) związanego z ubytkiem nabłonka, a dodatkowo przyspieszenie rehabilitacji wzrokowej i zmniejszenie ryzyka wystąpienia przymglenia podnabłonkowego (*haze*).

Znaczenie usunięcia lub zaoszczędzenia nabłonka w zabiegach powierzchniowych od lat stanowi przedmiot dyskusji. Zdaniem Lee i wsp. [23] obecność płatka zawierającego błonę podstawną nabłonka stanowi barierę ochronną dla istoty właściwej rogówki, chroni przed napływem komórek zapalnych i aktywatorów zapalenia (gł. TGF- β), pochodzących z filmu łzowego, ponadto zmniejsza apoptozę komórek przedniej stromy, zapobiega migracji keratocytów z głębszych warstw istoty właściwej, wreszcie hamuje późną podnabłonkową hiperplazję fibroblastów i syntezę nowego kolagenu, odpowiedzialnego za tworzenie tkanki bliznowatej. Zdaniem niektórych badaczy zaletami pozostawionego nabłonka są redukcja bólu pooperacyjnego i szybsze nabłonkowanie, wadą zaś jest nieregularna matryca, pod którą narasta nowy nabłonek [24]. Inni autorzy z kolei nie stwierdzają istotnej przewagi metody LASEK nad PRK [25]. Obecnie LASEK jest wykonywany rzadko.

EPI-LASIK/EBK

W metodzie EPI-LASIK nabłonek rogówki jest usuwany za pomocą tzw. epikeratomu napędzanego elektrycznie, zawierającego tnącą płytkę z PMMA i pracującego z częstotliwością ok. 12 000 drgań na sekundę. Bez względu na warunki uruchomienia mikrokeratomu jest uzyskanie odpowiedniego podciśnienia stabilizującego gałkę oczną. Z kolei w procedurze EBK (*Epi-Bowman keratectomy*) do zdjęcia nabłonka wykorzystuje się urządzenie *Epi-Clear*, czyli manualny epikeratom zawierający jednorazowe polimerowe multiostrze. Zaletą zabiegów EBK jest brak konieczności użycia alkoholu i podciśnienia. Procedura nie narusza błony Bowmana. Zdaniem niektórych autorów pozwala także skrócić czas rekonwalescencji oraz zmniejsza wczesny dyskomfort pooperacyjny [26, 27].

TE-PRK

W metodzie TE-PRK (*transepithelial PRK*), wprowadzonej w 2009 r., laser ekscymerowy jest wykorzystywa-

ny zarówno do usunięcia nabłonka rogówki, jak i do następnej ablacji odsłoniętej istoty właściwej. Zaletami tej techniki są: krótszy czas zabiegu, brak konieczności śródoperacyjnego oczyszczania stromy z resztek nabłonka, mniejsze ryzyko nadmiernej lub niehomogennej dehydratacji stromy rogówki, okrągła i regularna strefa deepitelializacji i związany z tym mniejszy dyskomfort pooperacyjny [28].

Tradycyjne zabiegi głębokie polegają na wypreparowaniu płatką rogówki, a następnie wykonaniu ablacji laserowej odsłoniętej istoty właściwej rogówki. Najnowszą i odmienną techniką głęboką stanowi metoda SMILE, w której stosowany jest wyłącznie laser femtosekundowy.

LASIK

LASIK (*laser-assisted in situ keratomileusis*) został wprowadzony w 1990 r. przez I. Pallikarisa i L. Buratto [29]. To najstarszy zabieg warstwowy, w którym preparowanie płatką rogówki wykonuje się za pomocą mikrokeratomu. Składa się on z dwóch części: pierścienia stabilizującego rogówkę i zasilanego elektrycznie ostrza osadzonego na głowicy, pracującego z częstotliwością 7500 drgań na minutę. Ruch głowicy tnącej może się odbywać w sposób rotacyjny lub poprzeczny, co prowadzi do powstania zawiasu płatką od góry lub od nosa. W przypadku wyższych wartości keratometrii (powyżej 47 D) technika ta stwarza większe ryzyko uzyskania otworu w płatką (*buttonhole*), natomiast w rogówkach płaskich (keratometria poniżej 40 D) może powstać tzw. wolny płatek, bez zawiasu (*free cap*).

FemtoLASIK

Wprowadzona przed ponad 10 laty metoda femtoLASIK wyeliminowała udział głowicy tnącej w preparowaniu płatką rogówki i zastąpiła ją laserową dysrupcją, czyli rozerwaniem włókien kolagenowych pod wpływem światła lasera femtosekundowego. Metoda ta stanowi modyfikację zabiegu LASIK, w której mikrokeratom zastąpiono laserem femtosekundowym. Obecnie jest ona najczęściej wykonywaną procedurą refrakcyjną w Europie Zachodniej i USA. Rosnąca popularność tej metody wynika przede wszystkim z lepszego profilu bezpieczeństwa [30] i mniejszych wahań ciśnienia wewnątrzgałkowego w trakcie preparowania płatką [31], a także z lepszego poczucia kontrastu [22], szybszej rehabilitacji wzrokowej [32] i mniejszej indukcji aberracji optycznych w stosunku do metody LASIK. Technologia wytwarzania płatką przekłada się także na rzadsze powikłania dotyczące powierzchni oka, takie jak zespół suchego oka czy abrazja śródoperacyjna nabłonka rogówki [33–36]. W systemach laserów femtosekundowych można indywidualizować parametry płatką, takie

jak jego kształt, grubość i średnica, a ponadto kąt cięcia bocznego, szerokość, kąt położenia i pozycja zawiasu płatką, tak aby uzyskać możliwie największą skuteczność i przewidywalność przeprowadzanej korekcji wady wzroku. Femtolaser pozwala chirurgowi także sterować angulacją kąta bocznego, co zmniejsza ryzyko wrastania nabłonka pod płatką oraz dodatkowo zwiększa stabilizację płatką. Preparowanie płatką rogówki przez laser femtosekundowy trwa ok. kilkunastu sekund. Możliwość preparowania cienkich płatków (o grubości poniżej 110 mikronów) wiąże się ze znacznie mniejszym ryzykiem wystąpienia objawów suchego oka w okresie pooperacyjnym [35, 36], a dodatkowo umożliwia wykonanie zabiegu płatkowego u pacjentów z niezbyt grubą rogówką i złożoną wadą wzroku.

FLEX I RELEX

Najnowszymi technikami refrakcyjnymi rogówki są metody związane z wyłącznym zastosowaniem lasera femtosekundowego. Preparuje on w stromie rogówki dysk (*lenticule*), który następnie zostaje wydobyty na zewnątrz albo przez standardowe cięcie okrężne, jak w technice femtoLASIK, co ma miejsce w metodzie FLEx (*femto-second lenticule extraction*), albo przez zaledwie 2-milimetrowe nacięcie w metodzie ReLEx (*refractive lenticule extraction*), nazywanej także metodą SMILE (*small incision lenticule extraction*). Pierwsze zabiegi FLEx zostały wykonane w 2006 r., a zabiegi ReLEx – w 2010 r. Główne zalety metody SMILE to wysoka efektywność zabiegu i redukcja ryzyka powikłań związanych z wytworzeniem i istnieniem płatką, takich jak:

- otwór w płatką (*buttonhole*)
- fałdy (*striae*)
- rozsiane warstwowe zapalenie rogówki (DLK, *diffuse lamellar keratitis*)
- wrastanie nabłonka pod płatką
- ektazja rogówki.

Redukcja ryzyka ektazji rogówki po zabiegu wynika z mniejszego wpływu procedury na biomechanikę tego narządu przez zminimalizowanie nacięcia pionowego (wertikalnego) (redukcja o 80% w stosunku do metody femtoLASIK) oraz przez usuwanie tkanki z głębszych warstw istoty właściwej rogówki, gdzie usieciowanie kolagenu jest słabsze. Zaletę metody SMILE stanowi także mniejsze obniżenie gęstości neuronów spłotu subbazylnego tego narządu w porównaniu z metodą femtoLASIK i rzadsze występowanie pooperacyjnego zespołu suchego oka [37–40]. Ograniczeniami metody SMILE są: nieco wolniejsza w stosunku do metody femtoLASIK rehabilitacja wzrokowa oraz brak możliwości wykonywania zabiegów w nadwzroczności na podstawie pomiarów topograficznych rogówki lub pomiarów *wavefront*.

PODSUMOWANIE

Wprowadzenie w 1990 r. metody LASIK oraz 10 lat później metody femtoLASIK stało się przełomem we współczesnej chirurgii refrakcyjnej rogówki. Zapewniły one mocną pozycję chirurgii laserowej wśród metod korekcji wad wzroku i wpłynęły na jej dalszy rozwój. Szacuje się, że liczba dotychczas wykonanych zabiegów LASIK i femtoLASIK w USA wynosi dwadzieścia kilka

milionów i każdego roku jest tam przeprowadzanych ok. miliona procedur. Znaczny postęp technologiczny doprowadził w ostatniej dekadzie do wprowadzenia nowych metod korekcji wad wzroku przy użyciu lasera femtosekundowego i do zwiększenia poziomu bezpieczeństwa zabiegów refrakcyjnych rogówki, ich skuteczności i przewidywalności, a także skrócenia czasu leczenia i rehabilitacji wzrokowej po zabiegu.

ADRES DO KORESPONDENCJI

lek. Marcin Smorawski

Klinika Okulistyczna Optegra w Warszawie
02-366 Warszawa, ul. Bitwy Warszawskiej 1920 nr 18
e-mail: m.smorawski@optegra.com.pl

Piśmiennictwo

1. Frederic DR. Myopia. *BMJ* 2002; 324: 1195-1199.
2. Saw SM, Katz J, Schein OD, et al. Epidemiology of myopia. *Epid Rev* 1996; 18: 175-187.
3. Dandona R, Dandona L. Refractive error blindness. *Bull World Health Organ* 2001; 79: 237-243.
4. Fyodorov SN, Durnev VV. Operation of dosaged dissection of corneal circular ligament in cases of myopia of mild degree. *Ann Ophthalmol* 1979; 11: 1885-1890.
5. Waring GO III, Lynn MJ, McDonnell PJ, et al. Results of the prospective evaluation of radial keratotomy (PERK) study 10 years after surgery. *Arch Ophthalmol* 1994; 112: 1298-1308.
6. Trokel SL, Srinivasan R, Braren B. Excimer laser surgery of the cornea. *Am J Ophthalmol* 1983; 96: 710-715.
7. Seiler T, Bende T, Wollensak J, Trokel SL. Excimer laser keratectomy for correction of astigmatism. *Am J Ophthalmol* 1988; 105: 117-124.
8. Kochevar IE. Cytotoxicity and mutagenicity of excimer laser radiation. *Lasers Surg Med* 1989; 9: 440-445.
9. Schalhorn SC, Farjo AA, Huang D, et al. Wavefront-guided LASIK for the correction of primary myopia and astigmatism. A report by the American Academy of Ophthalmology. *Ophthalmology* 2008; 115: 1249-1261.
10. Chalita MR, Chavala S, Xu M, et al. Wavefront analysis in post-LASIK eyes and its correlation with visual symptoms, refraction, and topography. *Ophthalmology* 2004; 111: 447-453.
11. Durrie DS. First 100 CustomCornea commercial eyes. *J Refract Surg* 2003; 19: S687-S690.
12. Mrochen M, Kaemmerer M, Seiler T. Clinical results of wavefront-guided laser in situ keratomileusis 3 months after surgery. *J Cataract Refract Surg* 2001; 27: 201-207.
13. Lingmin HE, Liu A, Manche EE. Wavefront-guided versus wavefront-optimized laser in situ keratomileusis for patients with myopia: A prospective randomized contralateral eye study. *Am J Ophthalmol* 2014; 157: 1170-1178.
14. Applegate RA, Howland HC. Refractive surgery, optical aberrations and visual performance. *J Refract Surg* 1997; 13: 295-299.
15. Aktunc R, Aktunc T. Centration of excimer laser photorefractive keratectomy and changes in astigmatism. *J Refract Surg* 1996; 12: S268-S271.
16. Taylor NM, Eikelboom RH, van Sarloos PP, Reid PG. Determining the accuracy of an eye tracking system for laser refractive surgery. *J Refract Surg* 2000; 16: S643-S646.
17. El Bahrawy M, Alió JL. Excimer laser 6(th) generation: state of the art and refractive surgical outcomes. *Eye Vis (Lond)* 2015; 2: 6.
18. Arbelaez MC, Vidal C, Arba-Mosquera S. Excimer laser correction of moderate to high astigmatism with a non-wavefront-guided aberration-free ablation profile: Six-month results. *J Cataract Refract Surg* 2009; 35: 1789-1798.

19. Vega-Estrada A, Alió JL, Arba Mosquera S, et al. Corneal higher order aberrations after LASIK for high myopia with a fast repetition rate excimer laser, optimized ablation profile, and femtosecond laser-assisted flap. *J Refract Surg* 2012; 28: 689-696.
20. Lubatschowski H, Maatz G, Heisterkamp A, et al. Application of ultrashort laser pulses for intrastromal refractive surgery. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2000; 238: 33-39.
21. Juhasz T, Loesel FH, Kurtz RM, et al. Corneal refractive surgery with femtosecond lasers. *IEEE J Select Topics Quantum Electron* 1999; 5: 902-910.
22. Montés-Micó R, Rodríguez-Galiero A, Alió JL. Femtosecond laser versus mechanical keratome LASIK for myopia. *Ophthalmology* 2007; 114: 62-68.
23. Lee JB, Choe CM, Kim HS, et al. Comparison of TGF- β 1 in tears following laser subepithelial keratomileusis and photorefractive keratectomy. *J Refract Surg* 2002; 18: 130-134.
24. Gamaly TO, El Danasoury A, El Maghraby A. A prospective, randomized, contralateral eye comparison of epithelial laser in situ keratomileusis and photorefractive keratectomy in eyes prone to haze. *J Refract Surg* 2007; 23(suppl): 1015-1020.
25. Taneri S, Oehler S, Koch J, et al. Effect of repositioning or discarding the epithelial flap in laser-assisted subepithelial keratectomy and epithelial laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2011; 37: 1832-1846.
26. Choi SK, Kim JH, Lee D, et al. Different epithelial cleavage planes produced by various epikeratomes in epithelial laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2008; 34: 2079-2084.
27. Pallikaris IG, Naoumidi II, Kalyvianaki MI, et al. Epi-LASIK: comparative histological evaluation of mechanical and alcohol-assisted epithelial separation. *J Cataract Refract Surg* 2003; 29: 1496-1501.
28. Buzzonetti L, Petrocelli G, Laborante A, et al. A new transepithelial phototherapeutic keratectomy mode using the NIDEK CXIII excimer laser. *J Refract Surg* 2009; 25: S122-S124.
29. Pallikaris IG, Papatzanaki ME, Stathi EZ, et al. Laser in situ keratomileusis. *Lasers Surg Med* 1990; 10: 463-468.
30. Davison JA, Johnson SC. Intraoperative complications of LASIK flaps using the IntraLase femtosecond laser in 3009 cases. *J Refract Surg* 2010; 26: 851-857.
31. Chaurasia SS, Luengo Gimeno F, Tan K, et al. In vivo real-time intraocular pressure variations during LASIK flap creation. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2010; 51: 4641-4645.
32. Tanna M, Schallhorn SC, Hettinger KA. Femtosecond laser versus mechanical microkeratome: a retrospective comparison of visual outcomes at 3 months. *J Refract Surg* 2009; 25(7 suppl): S668-S671.
33. Wilson SE. Laser in situ keratomileusis-induced (presumed) neurotrophic epitheliopathy. *Ophthalmology* 2001; 108: 1082-1087.
34. Ambrósio R Jr, Tervo T, Wilson SE. LASIK-associated dry eye and neurotrophic epitheliopathy: pathophysiology and strategies for prevention and treatment. *J Refract Surg* 2008; 24: 396-407.
35. Salomão MQ, Ambrósio R Jr, Wilson SE. Dry eye associated with laser in situ keratomileusis: mechanical microkeratome versus femtosecond laser. *J Cataract Refract Surg* 2009; 35: 1756-1760.
36. Rosa AM, Neto Murta J, Quadrado MJ, et al. Femtosecond laser versus mechanical microkeratomes for flap creation in laser in situ keratomileusis and effect of postoperative measurement interval on estimated femtosecond flap thickness. *J Cataract Refract Surg* 2009; 35: 833-838.
37. Moshirfar M, McCaughey MV, Reinstein DZ, et al. Small-incision lenticule extraction. *J Cataract Refract Surg* 2015; 41: 652-665.
38. Lin F, Xu Y, Yang Y. Comparison of the visual results after SMILE and femtosecond laser-assisted LASIK for myopia. *J Refract Surg* 2014; 30: 248-254.
39. Ganesh S, Gupta R. Comparison of visual and refractive outcomes following femtosecond laser-assisted lasik with SMILE in patients with myopia or myopic astigmatism. *J Refract Surg* 2014; 30: 590-596.
40. Ang M, Chaurasia SS, Angunawela RI. Femtosecond lenticule extraction (FLEX): clinical results, interface evaluation, and intraocular pressure variation. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2012; 53: 1414-1421.