

Применение алгоритмов машинного обучения для повышения точности результатов лазерной коррекции зрения

А.В. Осипов[✉], Л.В. Баталина, Н.Н. Дергачева, И.Б. Медведев

ФГАОУ «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова», ул. Островитянова, д. 1, Москва, 117997, Россия

Лазерная коррекция зрения (ЛКЗ) представляет собой высокотехнологичный метод коррекции аномалий рефракции, эффективность которого во многом зависит от точности предоперационной диагностики, индивидуализации параметров вмешательства и прогнозирования исходов. В последние годы всё активнее интегрируются алгоритмы машинного обучения (МО) на различных этапах ЛКЗ, способствуя трансформации офтальмохирургической практики в сторону персонализированного подхода. Цель данного обзора — систематизировать современные достижения в применении МО в лазерной рефракционной хирургии. В предоперационном периоде МО позволяет с высокой точностью отбирать пациентов, выявлять противопоказания (включая кератоконус), выбирать оптимальный метод вмешательства и рассчитывать параметры абляции. Используемые алгоритмы, включая «случайный лес», XGBoost и глубокие нейронные сети, демонстрируют превосходные показатели чувствительности и специфичности, нередко превосходя традиционные клинические методы. В послеоперационном периоде МО применяется для прогнозирования зрительных исходов, риска регрессии и необходимости повторной коррекции. Несмотря на высокую прогностическую точность, текущее применение искусственного интеллекта (ИИ) ограничено ретроспективным характером данных, отсутствием масштабной клинической валидации и необходимостью дальнейшей интеграции в клинические процессы. Обзор подчеркивает значимость дальнейших исследований для стандартизации, интероперабельности и регуляторной приемлемости ИИ-решений в офтальмологии.

Ключевые слова: кераторефракционная хирургия; лазерная коррекция зрения; машинное обучение; искусственный интеллект
Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов: отсутствует.

Для цитирования: Осипов А.В., Баталина Л.В., Дергачева Н.Н., Медведев И.Б. Применение алгоритмов машинного обучения для повышения точности результатов лазерной коррекции зрения. Российский офтальмологический журнал. 2025; 18 (3 Приложение): 23-6. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2025-18-3-supplement-23-26>

Application of machine learning algorithms to improve the accuracy of laser vision correction outcomes

Arseny V. Osipov[✉], Larisa V. Batalina, Nadezhda N. Dergacheva, Igor B. Medvedev

N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, 1, Ostrovityanova St., Moscow, 117997, Russia
dr.osipov.eyes@mail.ru

Laser vision correction (LVC) is a high-technology method of correcting refractive errors, the effectiveness of which largely depends on the precision of preoperative diagnostics, the individualization of surgical parameters, and the accurate prediction of postoperative outcomes. In recent years, machine learning (ML) algorithms have been increasingly integrated at various stages of the LVC process, contributing to the transformation of ophthalmic surgical practice toward a more personalized approach. This literature review aims to systematize current advancements in the application of ML in laser refractive surgery. In the preoperative phase, ML enables the accurate selection of suitable candidates, the identification of contraindications (including keratoconus), the choice of optimal surgical technique, and the calculation

of ablation parameters. Employed algorithms, such as random forest, XGBoost, and deep neural networks, exhibit excellent sensitivity and specificity, frequently outperforming conventional clinical methods. In the postoperative period, ML is utilized to predict visual outcomes, assess the risk of refractive regression, and determine the likelihood of enhancement procedures. Despite its high predictive accuracy, the current use of artificial intelligence (AI) remains constrained by the retrospective nature of available data, the lack of large-scale clinical validation, and the ongoing need for integration into clinical workflows. This review underscores the importance of further research to establish standardized protocols, ensure interoperability, and achieve regulatory compliance for AI-based solutions in ophthalmology.

Keywords: keratorefractive surgery; laser vision correction; machine learning; artificial intelligence

Conflict of interests: there is no conflict of interests.

Financial disclosure: no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

For citation: Osipov A.V., Batalina L.V., Dergacheva N.N., Medvedev I.B. Application of machine learning algorithms to improve the accuracy of laser vision correction outcomes. Russian ophthalmological journal. 2025; 18 (3 Supplement): 23-6 (In Russ.). <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2025-18-3-supplement-23-26>

Лазерная коррекция зрения (ЛКЗ), включая LASIK, PRK и KLEx, представляет собой широко применяемый метод рефракционной хирургии, при котором высокоточные лазеры изменяют форму роговицы для коррекции миопии, гиперметропии и астигматизма [1]. Машинное обучение (МО) — направление искусственного интеллекта (ИИ), использующее алгоритмы и статистические модели для анализа данных и автоматического улучшения результатов, — уже активно внедряется в офтальмологию [2]. ЛКЗ является многоэтапным процессом с обработкой значительных объемов клинической информации, что создает возможности для применения МО на всех стадиях: от отбора пациентов и диагностики противопоказаний до прогноза исходов и ведения осложнений. Интеграция ИИ-технологий позволяет повысить точность диагностики, индивидуализировать хирургический подход и улучшить предсказуемость результатов вмешательства.

Применение МО в предоперационном периоде:

1. *Отбор пациентов.* J. Choi и соавт. [3] оценивали эффективность больших языковых моделей (ChatGPT-4.0, Google Gemini, Microsoft Copilot) в ответах на вопросы пациентов о рефракционной хирургии и выявили, что ChatGPT-4.0 обеспечивает наивысшую точность и надежность информации. При этом ее ответы характеризовались низкой читабельностью и сложностью для непрофессиональной аудитории, что подчеркивает необходимость адаптации формулировок для широкой аудитории [3].

G. Kundu и соавт. [4] создали прогностическую ИИ-модель для предсказания вероятности того, что пациент запишется на лазерную коррекцию. Для анализа выборки из 423 записей медицинских карт использовали разные методы МО. Большую точность показал метод «случайный лес» (random forest, RF), имевший ROC-AUC 0,945 с чувствительностью 88,0 % и специфичностью 92,5 %. Авторы заключают, что такой подход позволит различным глазным центрам оптимизировать и упорядочивать поток пациентов на основе определенных факторов, что в свою очередь может привести к лучшему результату с точки зрения выбора пациентами операций [4].

T. Yoo и соавт. [5] выполнили ретроспективный анализ данных 18 480 пациентов, обследованных перед ЛКЗ, включая результаты рефрактометрии, биомикроскопии, кератотопографии, пахиметрии, измерения зрачка и анкетные данные. На их основе создана ансамблевая модель (метод опорных векторов, «случайный лес», нейронные сети, AdaBoost, Lasso), продемонстрировавшая высокую прогностическую эффективность (AUC внутренней валидации — 0,983; внешней — 0,972), превосходящую традиционные подходы к оценке риска [5]. В дальнейшем эти же

данные использовались для построения многоклассовой модели XGBoost, определяющей оптимальный метод коррекции или выявляющей противопоказания. Применение SHAP-анализа обеспечило интерпретируемость и согласованность результатов с клиническим опытом, а точность предсказаний достигала 81,0 % на внутреннем и 78,9 % на внешнем тестировании [6].

2. *Диагностика кератоконуса.* Y. Xie и соавт. [7] разработали модель на основе InceptionResNetV2 (с трансферным обучением) для классификации снимков роговицы (норма, подозрительные/ранние изменения, кератоконус, после ЛКЗ) и отбора кандидатов на рефракционную хирургию. Обученная на 6465 снимках 1385 пациентов модель достигла точности 94,7 % при валидации. На независимом тесте точность составила 95,0 %, что сопоставимо с опытными хирургами (92,8 %; $p = 0,72$). При выявлении противопоказаний к операции модель превзошла встроенные классификаторы Pentacam HR (95,0 % против 81,0 %; $p < 0,001$) в базе данных азиатских пациентов [7].

3. *Помощь в выборе метода.* J. Li и соавт. [8] разработали модель МО для помощи офтальмологам в выборе метода коррекции зрения (LASIK, PRK, SMILE) у пациентов с близорукостью. Модель обучалась на клинических данных 7081 пациента (2000–2017 гг.) с использованием 20 параметров, включая толщину роговицы, внутриглазное давление и рефракцию. Сравнивались шесть различных алгоритмов классификации (с последующей 10-кратной кросс-валидацией и настройкой гиперпараметров). Лучшие результаты показал Random Forest (точность: 0,8775 / левый глаз, 0,8229 / правый глаз; макро F1: 0,8019/0,8080). Наиболее важными признаками стали толщина роговицы, рефракция и новый индекс сфероцилиндрического преобразования. SHAP-анализ подтвердил соответствие модели клиническому опыту [8].

4. *Помощь в расчете объема абляции.* S. Park и соавт. [9] применили алгоритмы МО для предсказания номограмм сферы, цилиндра и оси астигматизма при операции SMILE, используя данные 3034 глаз с 4 категориальными и 28 числовыми признаками. Для построения моделей использовали множественную линейную регрессию, CART, AdaBoost, XGBoost и MLP, выбрав по результатам пятикратной перекрестной проверки модель с минимальным RMSE. Наилучшие показатели продемонстрировал AdaBoost, при точности ниже 0,25 D для сферы и цилиндра и 25° для оси в 0,969, 0,976 и 0,994 соответственно. Ограничением исследования стало отсутствие клинической проверки [9].

N. Luft и соавт. [10] сравнили современные традиционные номограммы для операции Small-Incision-Lenticule-Extraction (SMILE) с новыми номограммами на основе МО:

линейной модели (LM), обобщенной аддитивной смешанной модели (GAMM) и искусственной нейронной сети (ANN). В исследовании методы МО показали несколько лучший результат по сравнению с классической номограммой. Авторы отметили, что для дальнейшего увеличения предсказуемости необходимо повышение точности определения субъективной манифестной рефракции [10].

Применение МО в послеоперационном периоде

Прогнозирование результата. Q. Wan и соавт. [11] разработали модели глубокого обучения (DL-модель) для прогнозирования остроты зрения в раннем послеоперационном периоде после SMILE. Пациенты были разделены на ретроспективную и две проспективные когорты. Видеозаписи операций, полученные с помощью лазера VisuMax, классифицировали по результатам послеоперационной некорригированной остроты зрения через 24 ч и использовали для обучения модели ResNet50. После отбора ключевых признаков применялись классические алгоритмы МО с перекрестной проверкой. Разработанные модели показали высокую точность (AUC до 0,998 в ретроспективной и до 1,000 в проспективных когортах) как на уровне изображений, так и видео. Дополнительно DL-модель надежно распознавала интраоперационные осложнения, включая потерю вакуума, черные пятна и непрозрачный пузырьковый слой. Тепловые карты Grad-CAM подтвердили способность моделей локализовать зоны сканирования и выявлять осложнения [11].

M. Balidis и соавт. [12] выполнили ретроспективный анализ 4456 процедур лазерной рефракционной хирургии (PRK, LASEK, Epi-LASIK, LASIK), из которых 84 ($\approx 1,9\%$) потребовали повторного вмешательства. Для обучения и валидации модели использовали данные 2378 случаев без повторной коррекции и 70 случаев с документированной необходимостью повторного лечения (с наблюдением не менее года). Была разработана система из восьми независимых классификаторов на основе сетей векторного квантования с конкурентным слоем из 78 нейронов, бинарным выходом и обучением до 100 эпох. Окончательное решение принималось по принципу большинства голосов классификаторов. Разработанный ансамблевый алгоритм продемонстрировал высокую прогностическую точность в оценке необходимости повторной коррекции после первичной ЛКЗ (чувствительность — 0,8756; специфичность — 0,9286) [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Литературный обзор рассматривает применение методов МО в лазерной коррекции зрения, где технологии ИИ демонстрируют высокий потенциал в оптимизации всех этапов: от предоперационного планирования до прогноза исходов и ведения осложнений. МО позволяет точно от-

бирать пациентов, выявлять противопоказания (включая кератоконус), подбирать метод вмешательства и прогнозировать результаты с использованием ансамблевых моделей (XGBoost, «случайный лес», глубокое обучение) и классических алгоритмов, обеспечивающих точность, сопоставимую с экспертной, при сохранении клинической интерпретируемости решений (SHAP-анализ). В послеоперационном периоде МО выявляет риск регрессии, необходимость повторной коррекции и анализирует осложнения на основе видеоаналитики. Интеграция МО способствует переходу к персонализированной медицине, однако требует стандартизации данных, регуляторной прозрачности, клинической валидации и решения задач интероперабельности и интеграции ИИ в рабочие процессы.

Литература/References

1. Chang JY, Lin PY, Hsu CC, Liu CJ. Comparison of clinical outcomes of LASIK, Trans-PRK, and SMILE for correction of myopia. *J Chin Med Assoc.* 2022 Feb 1; 85 (2): 145–51. doi: 10.1097/JCMA.0000000000000674
2. Нероев В.В., Зайцева О.В., Петров С.Ю., Брагин А.А. Применение искусственного интеллекта в офтальмологии: настоящее и будущее. *Российский офтальмологический журнал.* 2024; 17 (2): 135–41. [Neroev V.V., Zaytseva O.V., Petrov S.Yu., Bragin A.A. Artificial intelligence in ophthalmology: the present and the future. *Russian ophthalmological journal.* 2024; 17 (2): 135–41 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-2-135-141>
3. Choi JY, Kim DE, Kim SJ, et al. Application of multimodal large language models for safety indicator calculation and contraindication prediction in laser vision correction. *NPJ Digital Medicine.* 2025; 8 (1): 82. <https://doi.org/10.1038/s41746-025-01487-4>
4. Kundu G, Virani I, Shetty R, et al. Role of artificial intelligence in determining factors impacting patients' refractive surgery decisions. *Indian Journal of Ophthalmology.* 2023; 71 (3): 810–7. https://doi.org/10.4103/ijo.ijo_2718_22
5. Yoo TK, Ryu IH, Lee G, et al. Adopting machine learning to automatically identify candidate patients for corneal refractive surgery. *NPJ Digit Med.* 2019 Jun 20; 2: 59. doi: 10.1038/s41746-019-0135-8
6. Yoo TK, Ryu IH, Choi H, et al. Explainable machine learning approach as a tool to understand factors used to select the refractive surgery technique on the expert level. *Transl Vis Sci Technol.* 2020 Feb 12; 9 (2): 8. doi: 10.1167/tvst.9.2.8
7. Xie Y, Zhao L, Yang X, et al. Screening candidates for refractive surgery with corneal tomographic-based deep learning. *JAMA Ophthalmol.* 2020 May 1; 138 (5): 519–26. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2020.0507
8. Li J, Dai Y, Mu Z, et al. Choice of refractive surgery types for myopia assisted by machine learning based on doctors' surgical selection data. *BMC Med Inform Decis Mak.* 2024 Feb 8; 24 (1): 41. doi: 10.1186/s12911-024-02451-0
9. Park S, Kim H, Kim L, et al. Artificial intelligence-based nomogram for small-incision lenticule extraction. *Biomed Eng Online.* 2021 Apr 23; 20 (1): 38. doi: 10.1186/s12938-021-00867-7
10. Luft N, Mohr N, Spiegel E, et al. Optimizing refractive outcomes of SMILE: Artificial Intelligence versus Conventional State-of-the-Art Nomograms. *Curr Eye Res.* 2024 Mar; 49 (3): 252–9. doi: 10.1080/02713683.2023.2282938
11. Wan Q, Yue S, Tang J, et al. Prediction of early visual outcome of small-incision lenticule extraction (SMILE) based on deep learning. *Ophthalmol Ther.* 2023 Apr; 12 (2): 1263–79. doi: 10.1007/s40123-023-00680-6
12. Balidis M, Papadopoulou I, Malandris D, et al. Using neural networks to predict the outcome of refractive surgery for myopia. *Open.* 2019; 229. <https://doi.org/10.1051/fopen/2019024>

Вклад авторов в работу: А.В. Осипов — сбор и анализ литературы, написание статьи; Л.В. Баталина, Н.Н. Дергачева — анализ литературы, написание и редактирование статьи; И.Б. Медведев — концепция и дизайн обзора, редактирование статьи.

Authors' contribution: A.V. Osipov — collection and analysis of literature, writing of the article; L.V. Batalina, N.N. Dergacheva — analysis of literature, writing and editing of the article; I.B. Medvedev — concept and design of the review, editing of the article.

Поступила: 12.08.2025. Переработана: 24.08.2025. Принята к печати: 25.08.2025

Originally received: 12.08.2025. Final revision: 24.08.2025. Accepted: 25.08.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ФГАОУ «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова», ул. Островитянова, д. 1, Москва, 117997, Россия

Арсений Владимирович Осипов — аспирант кафедры офтальмологии Института непрерывного образования и профессионального развития

Лариса Владимировна Баталина — канд. мед. наук, доцент кафедры офтальмологии Института непрерывного образования и профессионального развития

Надежда Николаевна Дергачева — канд. мед. наук, доцент кафедры офтальмологии Института непрерывного образования и профессионального развития

Игорь Борисович Медведев — д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой офтальмологии Института непрерывного образования и профессионального развития

Для контактов: Арсений Владимирович Осипов,
dr.osipov.eyes@mail.ru

N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, 1, Ostrovityanova St., Moscow, 117997, Russia

Arseny V. Osipov — PhD student, chair of ophthalmology, institute of continuous education and professional development

Larisa V. Batalina — Cand. of Med. Sci., associate professor, chair of ophthalmology, institute of continuous education and professional development

Nadezhda N. Dergacheva — Cand. of Med. Sci., associate professor, chair of ophthalmology, institute of continuous education and professional development

Igor B. Medvedev — Dr. of Med. Sci., professor, head of chair of ophthalmology, institute of continuous education and professional development

For contacts: Arseny V. Osipov,
dr.osipov.eyes@mail.ru