Оригинальная статья
УДК 617.753.2
DOI: https://doi.org/10.25276/2410-1257-2026-3-30-38

Разработка модели машинного обучения для расчета параметров кераторефракционной экстракции лентикулы

Е.В. Кечин[1, 2], А.В. Дога[1]

[1]*ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, Москва, Россия*
[2]*ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, Москва, Россия*

РЕФЕРАТ

Цель. Разработать модель машинного обучения для расчета параметров кераторефракционной экстракции лентикулы (KLEX).

Материал и методы. Сформирован набор данных о 116 глазах, которым для коррекции миопии провели операцию KLEX и достигли эмметропии. В качестве целевых переменных были данные сферического (SPH) и цилиндрического (CYL) компонентов рефракции, указанные в протоколе операции KLEX. Разрабатывали по 4 модели для каждой целевой переменной: XGBRegressor, LinearRegression, AdaBoostRegressor, RandomForestRegressor. Рассчитывали следующие метрики качества моделей: MAE (средняя абсолютная ошибка, дптр), RMSE (корень из среднеквадратичной ошибки, дптр) и R^2 (коэффициент детерминации). Для разработки и тестирования моделей машинного обучения общий набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборку в соотношении 70:30. Интерпретацию результатов расчетов лучшей модели осуществляли с использованием библиотеки SHAP. Для разработки веб-сервиса использовали библиотеку Streamlit. Для разработки программного обеспечения и моделей машинного обучения использовали язык программирования Python 3.

Результаты. Разработаны 8 моделей машинного обучения для расчетов параметров операции KLEX (по 4 для расчета SPH и CYL), среди которых наилучшее качество показала модель XGBRegressor для обеих целевых переменных. Метрики качества на тестовом наборе данных составили для SPH: MAE=0,12 дптр, RMSE=0,16 дптр, R^2=0,98; для CYL: MAE=0,05 дптр, RMSE=0,11, R^2=0,94. Наибольшее влияние на прогнозируемое значение SPH оказывает значение сферы по данным клинической рефракции до операции, а для расчета CYL — значение цилиндра до операции. На основании данных моделей разработан веб-сервис с графическим интерфейсом — калькулятор для расчета параметров операции кераторефракционной экстракции лентикулы.

Вывод. Разработанные модели машинного обучения для расчета параметров операции кераторефракционной экстракции лентикулы показали приемлемые результаты и возможность стандартизации опыта ведущих офтальмохирургов, а дальнейшие исследования будут способствовать повышению клинико-функциональных результатов лечения.

Ключевые слова: *кераторефракционная экстракция лентикулы, KLEX, CLEAR, веб-сервис, расчет параметров операции, машинное обучение*

Для цитирования: Кечин Е.В., Дога А.В. Разработка модели машинного обучения для расчета параметров кераторефракционной экстракции лентикулы. *Точка зрения. Восток–Запад.* 2026;13(3): 30–38. https://doi.org/10.25276/2410-1257-2026-3-30-38

Автор, ответственный за переписку: Кечин Евгений Владимирович, evgeny.kechin@gmail.com

Original article

Development of a machine learning model for calculating the parameters of keratorefractive lenticule extraction surgery

E.V. Kechin[1, 2], A.V. Doga[1]

[1]*S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, Moscow, Russia*
[2]*FSBEI FPE RMACPE MOH Russia, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Purpose. To develop a machine learning model for calculating parameters for keratorefractive lenticule extraction (KLEX) surgery.

© Кечин Е.В., Дога А.В., 2026

Material and methods. The dataset was compiled from 116 eyes that underwent KLEX surgery for myopia correction and achieved emmetropia. The target variables were the spherical (SPH) and cylindrical (CYL) refractive components specified in the KLEX protocol. Four models were developed for each target variable: XGBRegressor, LinearRegression, AdaBoostRegressor, and RandomForestRegressor. The following model performance metrics were calculated: MAE (mean absolute error, D), RMSE (root mean square error, D), and R^2 (the coefficient of determination). To develop and test the machine learning models, the overall dataset was split into training and testing sets at a 70:30 ratio. The SHAP library was used to interpret the calculation results of the best model. The Streamlit library was used to develop the web service. Python 3 was used to develop the software and machine learning models.

Results. Eight machine learning models were developed to calculate the KLEX surgery parameters (four each for SPH and CYL), of which the XGBRegressor model demonstrated the best performance for both target variables. Quality metrics on the test data set were: MAE=0.12 D, RMSE=0.16 D, R^2=0.98 for SPH; MAE=0.05 D, RMSE=0.11, R^2=0.94 for CYL. The sphere value based on preoperative clinical refraction has the greatest impact on the predicted SPH value, while the cylinder value for CYL is the most significant factor. Based on these models, a web service with a graphical interface was developed — a calculator for calculating the parameters of keratorefractive lenticule extraction surgery.

Conclusion. The developed machine learning models for calculating the parameters of keratorefractive lenticule extraction surgery demonstrated acceptable results and the potential to standardize the experience of leading ophthalmic surgeons. Further research will contribute to improving the clinical and functional outcomes of treatment.

Keywords: *keratorefractive lenticule extraction, KLEX, CLEAR, web service, calculation of surgical parameters, machine learning*

For citation: Kechin E.V., Doga A.V. Development of a machine learning model for calculating the parameters of keratorefractive lenticule extraction surgery. *Point of view. East–West.* 2026;13(3): 30–38.
https://doi.org/10.25276/2410-1257-2026-3-30-38

Corresponding author: Evgeny V. Kechin, evgeny.kechin@gmail.com

АКТУАЛЬНОСТЬ

Согласно информации Всемирной организации здравоохранения (2019), аномалии рефракции представляют собой наиболее часто диагностируемую патологию органа зрения во всем мире [1]. Среди данной группы заболеваний первое место по распространенности принадлежит миопии, которая в среднем выявляется у 25% населения, а в странах Юго-Восточной Азии этот показатель достигает 80% [2]. По имеющимся прогнозам, к 2050 г. миопией будет страдать каждый второй житель планеты [3]. В Российской Федерации близорукость также лидирует в структуре общей офтальмологической заболеваемости [4], уровень заболеваемости среди взрослого населения РФ составляет 1108,1 на 100 тыс. человек (2022 г.) [5].

На современном этапе развития офтальмологии существуют три основных метода коррекции аномалий рефракции, и, в частности, миопии, а именно — очки, контактные линзы и лазерная кераторефракционная хирургия [2]. Среди последних самым современными методом хирургической коррекции является операция — кераторефракционная экстракция лентикулы (Keratorefractive Lenticule Extraction, KLEX), которая у различных производителей имеет свое торговое название, например, CLEAR, SMILE, SmartSight [6].

Одним из основных этапов в подготовке к проведению операции KLEX является расчет параметров операции, который зачастую основан на опыте хирурга и не имеет стандартизации. Вместе с тем внедрение технологий искусственного интеллекта и машинного обучения в медицину позволяет избавить врачей от рутинной практики и разработать модели расчетов различных параметров, что особенно актуально в рефракционной хирургии для расчета параметров операции с учетом различных данных пациентов, что, несомненно, облегчит работу как начинающим, так и опытным офтальмологам и приведет к повышению предсказуемости операции [7]. Однако в зарубежной литературе встречаются лишь единичные работы на данную тему, а в Российской Федерации они отсутствуют, что и определило цель настоящего исследования.

ЦЕЛЬ

Разработать модель машинного обучения для расчета параметров операции — кераторефракционной экстракции лентикулы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Отбор пациентов

Исследование проводили согласно принципам Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации в редакции от 2013 г. Все диагностическое и лечебное оборудование, используемое в настоящем исследовании, зарегистрировано на территории Российской Федерации и имеет все необходимые документы для применения. При отборе пациентов на проведение операции кераторефракционной экстракции лентикулы руководствовались показаниями и противопоказаниями к данной технологии. Все пациенты подписали информированное добровольное согласие на медицинское вмешательство. Все методы обследования, проведенные в настоящем исследовании, включены в стандартное обследование пациентов с аномалиями рефракции, утвержденное в ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России.

Исследование проведено у пациентов с миопией, подвергшихся коррекции аномалий рефракции по методу кераторефракционной экстракции лентикулы CLEAR. Пациентов отбирали сплошным методом, по мере поступления в клинику. Критерии включения пациентов в исследование: операция CLEAR, стационарная миопия от –0,50 до –9,00 дптр включительно без или с астигматизмом до –2,00 дптр включительно, возраст от 18 до 60 лет, данные сферического и цилиндрического компонентов рефракции в послеоперационном периоде 0 дптр. Критерии исключения пациентов из исследования: некор-

ригированная острота зрения (НКОЗ) в послеоперационном периоде менее 1,0.

Обследование пациентов

Перед проведением рефракционной лазерной операции всем пациентам выполняли полное офтальмологическое обследование. В послеоперационном периоде на сроке 1-е сутки и через 3 месяца после вмешательства проводили определение НКОЗ и максимальной корригированной остроты зрения (МКОЗ), авторефрактометрию.

Кераторефракционная экстракция лентикулы

Все операции проведены в ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России. После проведения местной анестезии (оксибупрокаин 0,4%) с помощью фемтолазерной установки Femto LDV Z8 (Ziemer Ophthalmic Systems AG, Швейцария) проводили операцию — кераторефракционную экстракцию лентикулы CLEAR. Во всех случаях целевой рефракцией была эмметропия. В послеоперационном периоде всем пациентам назначали в каплях антисептик (бензилдиметил-миристоиламино-пропиламмоний 0,01%) 3 раза в день в течение 1 недели, антибиотик (тобрамицин 0,3%) 3 раза в день в течение 1 недели, глюкокортикостероид (дексаметазон 0,1%) по схеме: 1-я неделя — 3 раза в день, 2-я неделя — 2 раза в день, 3-я неделя — 1 раз в день, слезозаместитель (натрия гиалуронат 0,1%) — до 8 раз в день в течение 6 месяцев.

Формирование набора данных

Первичные данные были выгружены из медицинской информационной системы ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России в формате .xlsx. Протоколы операции кераторефракционной экстракции лентикулы с параметрами операции были выгружены из базы данных фемтолазерной установки Femto LDV Z8 в формате .pdf (по принципу: один глаз — один протокол операции — один файл). Для извлечения данных из протоколов операции CLEAR в автоматизированном виде и формирования таблицы в формате .xlsx использовали программу собственной разработки «Модуль для извлечения данных из протоколов операций кераторефракционной экстракции лентикулы CLEAR» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025683015 от 29.08.2025, автор и разработчик Кечин Е.В.) [8].

Статистический анализ

Обработку данных проводили с использованием языка программирования Python 3 и прикладных библиотек Pandas и SciPy. Характер распределения данных оценивали с использованием критерия Шапиро–Уилка. Результаты представлены в виде Me (Q_1; Q_3), где Me — медиана, Q_1 и Q_3 — нижний и верхний квартили соответственно, а также в виде абсолютных значений и процентов, рассчитывали минимальное (min) и максимальное (max) значения.

Разработка моделей машинного обучения

Разработку регрессионных моделей машинного обучения для расчета сферического и цилиндрического компонентов рефракции проводили с использованием библиотек scikit-learn, XGBoost и LightGBM. Разрабатывали по 4 модели для каждой целевой переменной: XGBRegressor, LinearRegression, AdaBoostRegressor, RandomForestRegressor. Целевыми переменными являлись значения сферического и цилиндрического компонентов рефракции, заданные в параметры операции CLEAR фемтосекундной лазерной установки (LaserCorrection_SPH и LaserCorrection_CYL соответственно). Значение пола пациента кодировали значением 0 для женщин и 1 для мужчин. Для модели LinearRegression проводили нормализацию данных в диапазоне 0–1, другие разрабатываемые модели не требуют нормализации и показывают идентичные результаты как с нормализацией, так и без нормализации данных. Весь набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборки в соотношении 70:30 соответственно (81 глаз — в обучающей и 35 глаз — в тестовой выборках). Подбор гиперпараметров проводили с использованием метода GridSearchCV с 10-кратной кросс-валидацией, оптимизировали метрику 'neg_mean_absolute_error'.

Качество модели оценивали по следующим метрикам:

MAE — среднее абсолютное отклонение прогноза — показывает, насколько в среднем модель ошибается (отклонение прогнозируемого значения от фактического) в аналогичных единицах измерения: чем меньше данная метрика, тем лучше, кроме того, данная метрика менее чувствительна к выбросам по сравнению с RMSE;

RMSE — корень из среднеквадратичной ошибки прогноза — показывает то же, что и MAE, однако метрика более чувствительна к выбросам (значительным отклонениям от большинства данных);

R^2 — коэффициент детерминации — показывает долю дисперсии целевой переменной, объясняемой моделью регрессии (зависимыми переменными, предикторами), и может принимать значения от 0 до 1: чем ближе к 1, тем лучше, при значении 1 модель описывает 100% данных, при 0 — 0%. В качестве главной метрики приняли MAE. Оценку важности признаков моделей машинного обучения и интерпретацию результатов проводили с использованием библиотеки SHAP.

Разработка веб-сервиса

Разработку веб-сервиса калькулятора для расчета параметров кераторефракционной экстракции лентикулы проводили с использованием библиотеки Streamlit для языка программирования Python 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общая характеристика набора данных, на котором разрабатывали модели машинного обучения, представлена в *таблице 1*.

В качестве независимых переменных, на основании которых разрабатывали модели машинного обучения, были выбраны следующие показатели, на которые ориентируются хирурги при расчете параметров операции: возраст, пол, диаметр оптической зоны, минимальная толщина роговицы, толщина «Cap», SPH до, CYL до, Ax до, K1 до, K2 до.

Лучшее качество моделей для расчета как сферического, так и цилиндрического компонентов рефрак-

Таблица 1

Общая характеристика набора данных для разработки моделей машинного обучения для расчета сферического и цилиндрического компонентов рефракции для кераторефракционной экстракции лентикулы

Table 1

General characteristics of the dataset for developing machine learning models for calculating the spherical and cylindrical components of refraction for keratorefractive lenticule extraction surgery

Параметр / Parameter	Me	Q_1	Q_3	Min	Max
Всего глаз, абс. (%) / Total eyes, abs. (%)	116 (100,0)				
Всего человек, абс. (%) / Total number of people, abs. (%)	116 (100,0)				
из них мужчин, абс. (%) of which men, abs. (%)	37 (31,9)				
женщин, абс. (%) women, abs. (%)	79 (68,1)				
Возраст, лет / Age, years	31,50	25,00	34,00	18,00	41,00
Параметры операции Surgery parameters					
Коррекция SPH, дптр / SPH correction, D	−4,50	−5,50	−3,75	−7,75	−2,25
Коррекция CYL, дптр / CYL correction, D	0,00	−0,75	0,00	−2,00	0,00
Коррекция Ax, градус / Ax correction, degrees	180,00	175,00	180,00	5,00	180,00
Коррекция SE, дптр / SE correction, D	−4,75	−5,88	−3,75	−8,25	−2,25
Диаметр оптической зоны, мм / Optical zone diameter, mm	6,70	6,50	6,70	6,30	6,80
Минимальная толщина роговицы, мкм Minimum corneal thickness, μm	549,50	528,75	567,00	500,00	629,00
Толщина «Cap», мкм / Thickness «Cap», μm	110,00	110,00	110,00	110,00	120,00
Cap_Rim, мм / Cap_Rim, mm	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Клинико-морфофункциональные результаты до и после операции Clinical and morphofunctional results before and after surgery					
НКОЗ до, ед. / UDVA pre op, decimal	0,04	0,04	0,05	0,02	0,30
SPH до, дптр / SPH pre op, D	−3,75	−4,75	−2,75	−6,75	−1,50
CYL до, дптр / CYL pre op, D	−0,50	−0,50	0,00	−2,00	0,00
Ax до, градус / Ax pre op, degrees	37,50	0,00	153,75	0,00	180,00
SE до, дптр / SE pre op, D	−3,75	−5,03	−3,00	−7,25	−1,50
МКОЗ до, ед. / CDVA pre op, decimal	1,00	1,00	1,00	0,90	1,20
K1 до, дптр / K1 pre op, D	43,25	42,50	44,00	41,00	46,25
Ax 1 до, градус / Ax 1 pre op, degrees	15,00	5,00	170,00	0,00	180,00
K2 до, дптр / K2 pre op, D	44,25	43,44	45,00	41,50	47,25
Ax 2 до, градус / Ax 2 pre op, degrees	90,00	85,00	100,00	15,00	145,00
НКОЗ 3 мес, ед. / UDVA 3 moths, decimal	1,00	1,00	1,00	1,00	1,20
SPH 3 мес, дптр / SPH 3 moths, D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CYL 3 мес, дптр / CYL 3 moths, D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ax 3 мес, градус / Ax 3 moths, degrees	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SE 3 мес, дптр / SE 3 moths, D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
МКОЗ 3 мес, дптр / CDVA 3 moths, decimal	1,00	1,00	1,00	1,00	1,20

ции на тестовой выборке по целевой метрике качества (MAE) показала модель XGBRegressor: средняя абсолютная ошибка для SPH составила 0,12 дптр, для CYL — 0,05 дптр *(табл. 2)*. Данные значения можно интерпретировать как приемлемые.

Наибольшее влияние на прогнозируемое значение сферического компонента оказывает значение сферы по данным клинической рефракции до операции *(рис. 1)*, а для расчета цилиндрического компонента — значение цилиндра до операции *(рис. 2)*. При этом для обеих моделей видна прямая зависимость влияния дооперационных значений сферы и цилиндра на расчетное значение соответствующего параметра в модели *(рис. 3, 4)*.

Для практического использования разработанных моделей был разработан веб-сервис «Калькулятор для расчета параметров операции кераторефракционной экстракции лентикулы» (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025688287 от 17.10.2025, автор и разработчик Кечин Е.В.) *(рис. 5)* [9]. Калькулятор

Таблица 2

Метрики качества моделей машинного обучения для расчета сферического (SPH) и цилиндрического (CYL) компонентов рефракции для кераторефракционной экстракции лентикулы

Table 2

Quality metrics of machine learning models for calculating spherical (SPH) and cylindrical (CYL) refractive components for keratorefractive lenticule extraction surgery

Модель Model	Тестовая выборка Test dataset			Обучающая выборка Train dataset		
	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE	R^2
Целевая переменная сферический компонент рефракции (SPH) Target variable spherical component of refraction (SPH)						
XGBRegressor	0,12	0,16	0,98	0,04	0,05	1,00
LinearRegression	0,16	0,20	0,96	0,13	0,17	0,98
AdaBoostRegressor	0,17	0,20	0,96	0,12	0,14	0,99
RandomForestRegressor	0,17	0,21	0,96	0,09	0,13	0,99
Целевая переменная цилиндрический компонент рефракции (CYL) Target variable cylindrical component of refraction (CYL)						
XGBRegressor	0,05	0,11	0,94	0,00	0,00	1,00
AdaBoostRegressor	0,06	0,14	0,91	0,06	0,12	0,94
RandomForestRegressor	0,08	0,13	0,92	0,04	0,07	0,98
LinearRegression	0,19	0,22	0,77	0,19	0,25	0,75

Примечание: MAE — Mean Absolute Error (средняя абсолютная ошибка прогноза, дптр), RMSE — Root Mean Square Error (корень из среднеквадратичной ошибки прогноза, дптр), R^2 — коэффициент детерминации.

Note: MAE — Mean Absolute Error (mean absolute error of the forecast, diopters), RMSE — Root Mean Square Error (root mean square error of the forecast, diopters), R^2 — coefficient of determination.

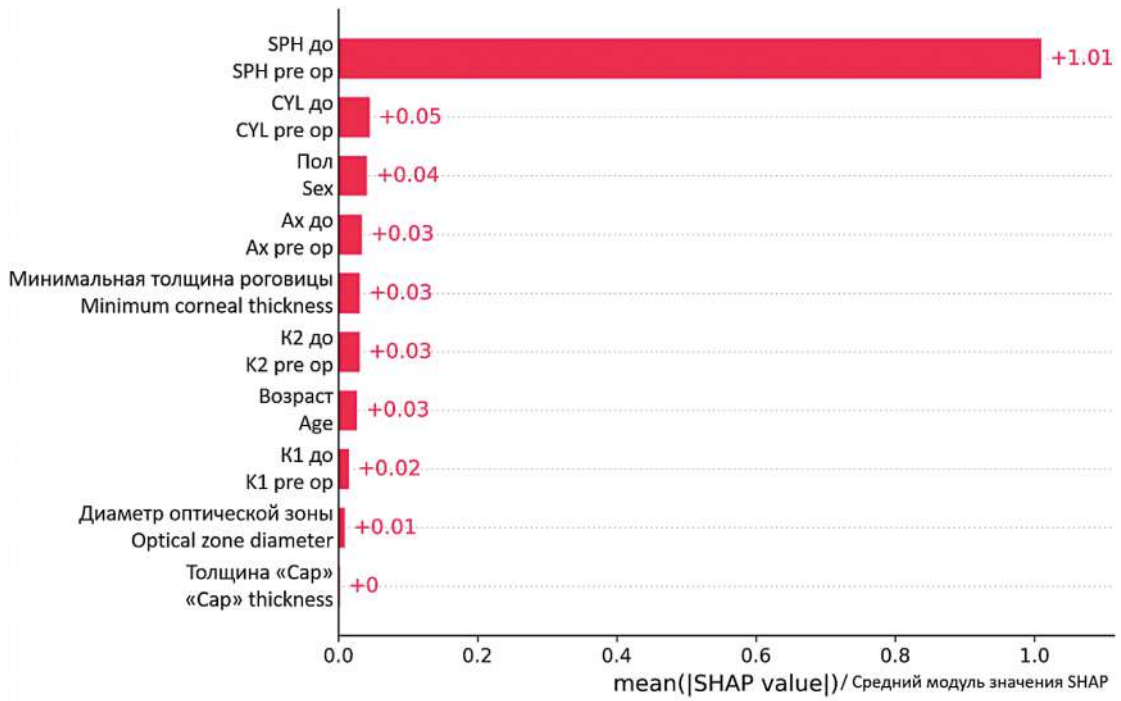

Рис. 1. Средний модуль SHAP-значения влияния параметров пациента на результаты расчета сферического компонента рефракции для кераторефракционной экстракции лентикулы в модели XGBRegressor

Fig. 1. The average modulus of the SHAP value of the influence of patient parameters on the results of calculating the spherical component of refraction for keratorefractive lenticule extraction surgery in the XGBRegressor model

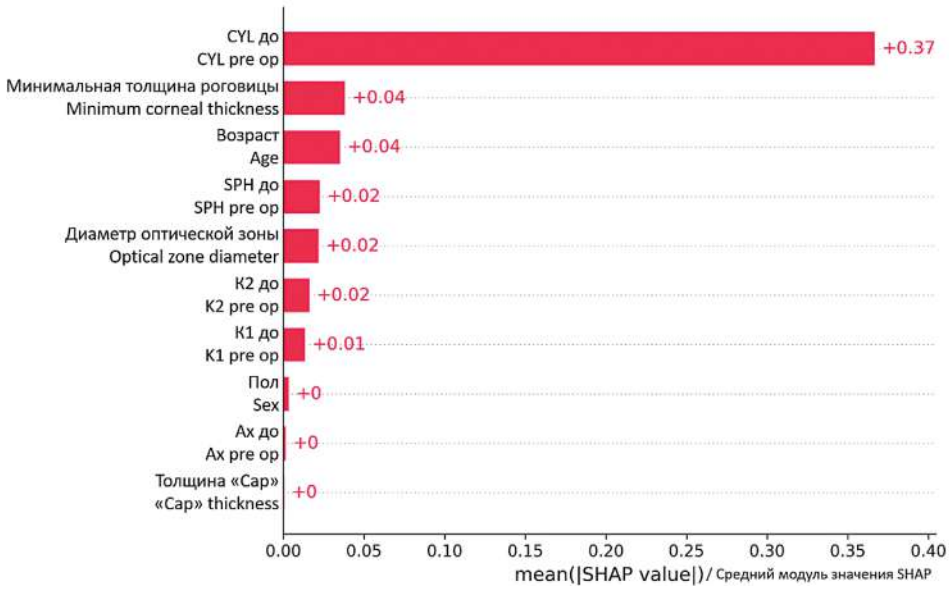

Рис. 2. Средний модуль значения SHAP влияния параметров пациента на результаты расчета цилиндрического компонента рефракции для кераторефракционной экстракции лентикулы в модели XGBRegressor

Fig. 2. The average modulus of the SHAP value of the influence of patient parameters on the results of calculating the cylindrical component of refraction for keratorefractive lenticule extraction surgery in the XGBRegressor model

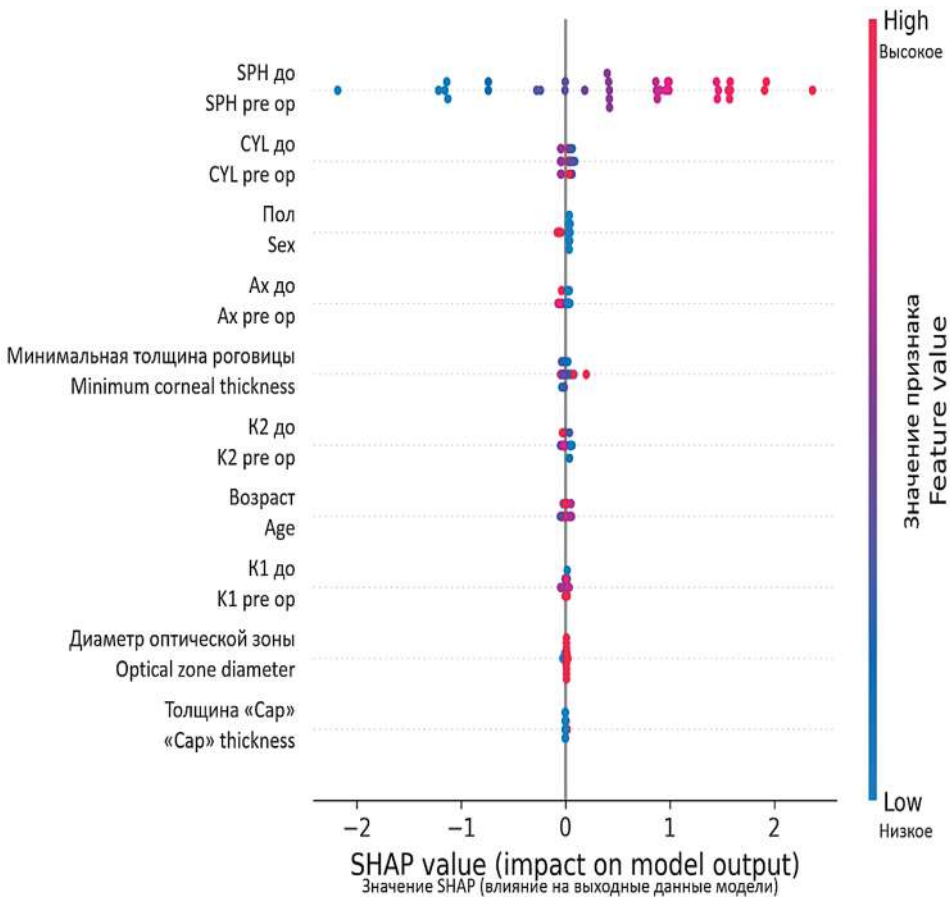

Рис. 3. Влияние параметров пациента на результат расчета сферического компонента рефракции для кераторефракционной экстракции лентикулы в модели XGBRegressor

Fig. 3. The influence of patient parameters on the result of calculating the spherical component of refraction for keratorefractive lenticule extraction surgery in the XGBRegressor model

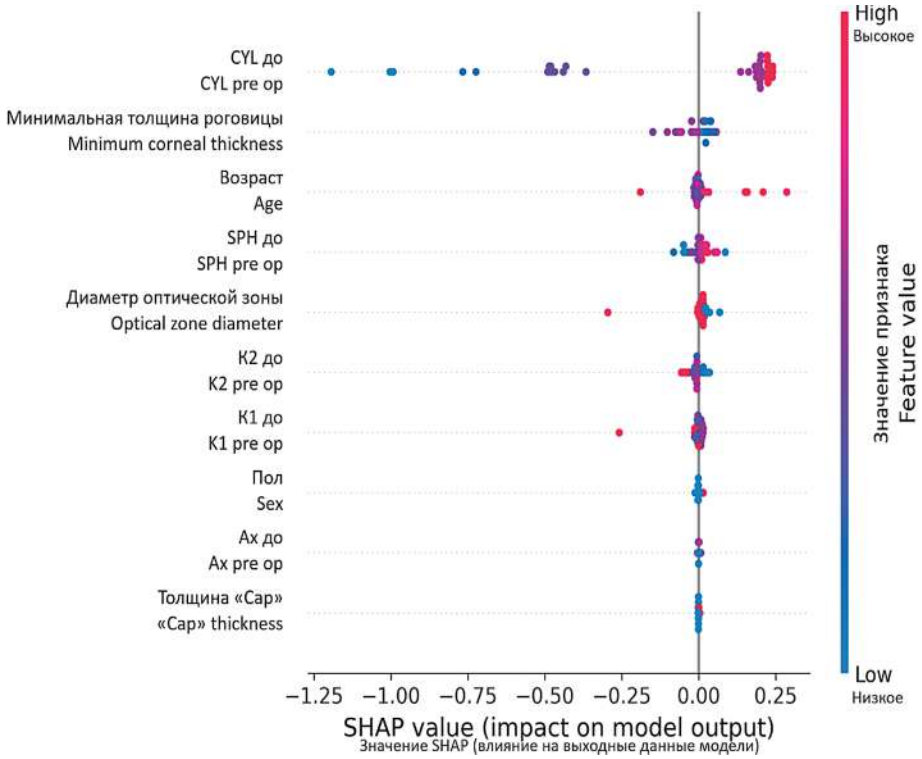

Рис. 4. Влияние параметров пациента на результат расчета цилиндрического компонента рефракции для кераторефракционной экстракции лентикулы

Fig. 4. The influence of patient parameters on the result of calculating the cylindrical component of refraction for keratorefractive lenticule extraction surgery

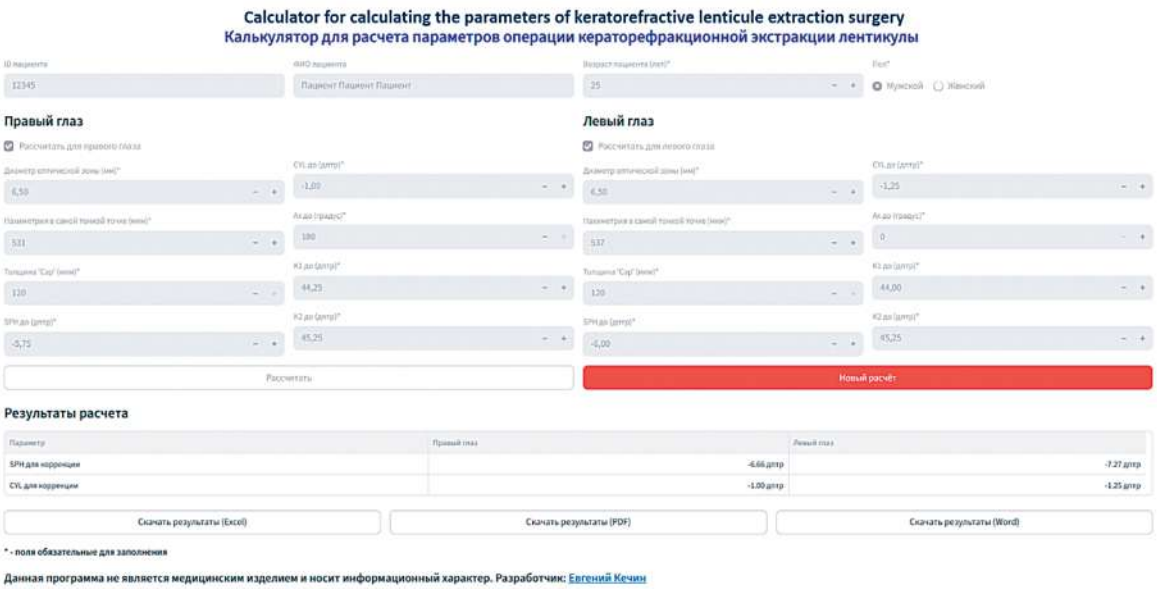

Рис. 5. Калькулятор для расчета параметров кераторефракционной экстракции лентикулы (пример расчета)

Fig. 5. Calculator for calculating the parameters of the keratorefractive lenticule extraction operation (calculation example)

осуществляет расчет сферического (SPH) и цилиндрического (CYL) компонентов рефракции для кераторефракционной экстракции лентикулы в браузере, а также экспорт (скачивание) результатов в форматах .xlsx, .pdf, .docx.

ОБСУЖДЕНИЕ

Лазерные рефракционные операции являются одними из самых распространенных офтальмологических опера-

ций. Такие операции являются эффективным, безопасным и предсказуемым методом коррекции аномалий рефракции. Среди данных операций кераторефракционная экстракция лентикулы является самым современным хирургическим методом коррекции миопии. Однако, пока не достигнуты стопроцентная эффективность, безопасность и предсказуемость операции, актуальным является совершенствование технологий коррекции аномалий рефракции [2].

По данным T. Cui и соавт. (2020) [7], применение методов машинного обучения для расчета параметров операции KLEX показало большие индексы эффективности по сравнению с группой, в которой проводили расчет по номограмме хирурга (1,48±1,08 против 1,3±0,27, p<0,05), также авторы показали, что предсказуемость операции в пределах ±0,5 дптр была выше в группе с применением методов машинного обучения (93% против 83%).

Исследование E. Yeu и соавт. (2013) [10] показало, что в США во время прохождения резидентуры по офтальмологии 88,7% молодых врачей выполняли более 100 операций по удалению катаракты в качестве основных хирургов, в то время как более 75% молодых врачей не провели ни одной лазерной рефракционной операции, а те, кто их проводил, делали это в единичных случаях. Авторы исследования заключили, что имеются существенные недостатки в моделях обучения рефракционной хирургии роговицы. Вместе с тем работа P. Liu и соавт. (2025) [11] показала, что номограмма, рассчитанная с применением модели машинного обучения XGBoost, для параметров кераторефракционной экстракции лентикулы SMILE была статистически значимо более предсказуемой в пределах 0,05–0,25 дптр, чем номограмма резидентов (молодых врачей-офтальмологов) (p<0,05). Авторы заключили, что методы машинного обучения могут помочь рефракционным хирургам, а также сократят время обучения молодых резидентов (врачей-ординаторов) при корректировке номограммы.

Авторам настоящего исследования не удалось найти работы, в которых разрабатывали модель машинного обучения для расчета параметров кераторефракционной экстракции лентикулы CLEAR, что может свидетельствовать о том, что данное исследование является первым. Вместе с тем настоящее исследование также показало, что модель XGBoost показывает лучшие метрики качества (MAE), что сопоставимо с другими исследованиями, в которых использовали различные модели для расчета параметров кераторефракционной экстракции лентикулы SMILE [11]. Кроме того, в настоящем исследовании значение метрики качества RMSE в модели XGBoost для сферы и цилиндра составили 0,16 и 0,11 дптр соответственно, что сопоставимо с зарубежными исследованиями, которые получили значения для аналогичных параметров при операции SMILE как 0,14 и 0,12 дптр, используя модель AdaBoost [12]. К тому же в настоящем исследовании разработан интуитивно понятный веб-сервис для расчета параметров кераторефракционной экстракции лентикулы, который может быть использован практическими врачами.

К ограничениям настоящего исследования можно отнести отсутствие внешней валидации модели, что будет проведено в ходе дальнейших исследований, в т.ч. с увеличением объема выборки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные модели машинного обучения для расчета параметров кераторефракционной экстракции лентикулы показали приемлемые результаты и возможность стандартизации опыта ведущих офтальмохирургов, а дальнейшие исследования будут способствовать повышению клинико-функциональных результатов лечения.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. World Health Organization. World report on vision. Geneva; 2019. 180 p.
2. Дога А.В., Мушкова И.А., Семенов А.Д. и др. Этапы развития и современные аспекты кераторефракционной хирургии. Практическая медицина. 2016;6(98): 36–41.
   Doga AV, Mushkova IA, Semenov AD, et al. Stages of development and modern aspects of keratorefractive surgery. *Practical medicine.* 2016;6(98): 36–41. (In Russ.).
3. Sankaridurg P, Tahhan N, Kandel H, et al. IMI Impact of Myopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2021;62(5): 2. https://doi.org/10.1167/iovs.62.5.2
4. Нероев В.В. Организация офтальмологической помощи населению Российской Федерации. *Вестник офтальмологии.* 2014;130(6): 8–12.
   Neroyev VV. Eye care management in Russian Federation. *Russian Annals of Ophthalmology.* 2014;130(6): 8–12. (In Russ.).
5. Дога А.В., Кечин Е.В., Мушкова И.А., и др. Динамика заболеваемости миопией у взрослого населения в Российской Федерации, Центральном федеральном округе и г. Москве за 2009–2022 гг. и прогноз до 2025 гг. *Социальные аспекты здоровья населения.* 2024;70(5): 3. Доступно по: http://vestnik.mednet.ru/content/view/1647/30/lang,ru/ [Ссылка активна на 31.03.2026].
   Doga AV, Kechin EV, Mushkova IA, et al. Dynamics of myopia incidence in the adult population of the Russian Federation, the Central Federal District, and Moscow for 2009–2022 and forecast until 2025. *Social'nye aspekty zdorov'a naselenia.* 2024;70(5): 3. Available from: http://vestnik.mednet.ru/content/view/1647/30/lang,ru/ [Accessed 31st March 2026] (In Russ). https://doi.org/10.21045/2071-5021-2024-70-5-3
6. Dupps WJ Jr, Randleman JB, Kohnen T, et al. Scientific nomenclature for keratorefractive lenticule extraction (KLEx) procedures: a joint editorial statement. *J Cataract Refract Surg.* 2023;49(11): 1085. https://doi.org/10.1097/j.jcrs.0000000000001328
7. Cui T, Wang Y, Ji S, et al. Applying Machine Learning Techniques in Nomogram Prediction and Analysis for SMILE Treatment. *Am J Ophthalmol.* 2020;210: 71–7. https://doi.org/10.1016/j.ajo.2019.10.015
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025683015/ 29.08.2025. Бюл. № 9. Кечин Е.В. Модуль для извлечения данных из протоколов операций кераторефракционной экстракции лентикулы CLEAR. Доступно по: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025683015&TypeFile=html [Ссылка активна на 31.03.2026].
   Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM №2025683015/ 29.08.2025. Byul. № 9. Kechin E.V. Modul' dlya izvlecheniya dannykh iz protokolov operatsii keratorefraktsionnoi ekstraktsii lentikuly CLEAR. Available from: https://new.fips.ru/registers-doc view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025683015&TypeFile=html [Accessed 31st March 2026] (In Russ).
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025688287/ 17.10.2025. Бюл. № 10. Кечин Е.В. Веб-интерфейс калькулятора для расчета параметров операции кераторефракционной экстракции лентикулы. Доступно по: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025688287&TypeFile=html. [Ссылка активна на 31.03.2026].
   Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM №2025688287/ 17.10.2025. Byul. № 10. Kechin E.V. Veb-

interfeis kal'kulyatora dlya rascheta parametrov operatsii keratorefraktsionnoi ekstraktsii lentikuly. Available from: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2025688287&TypeFile=html [Accessed 31st March 2026] (In Russ).
10. Yeu E, Reeves SW, Wang L, Randleman JB. ASCRS Young Physicians and Residents Clinical Committee. Resident surgical experience with lens and corneal refractive surgery: survey of the ASCRS Young Physicians and Residents Membership. *J Cataract Refract Surg.* 2013;39(2): 279–84. https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2012.09.029
11. Liu P, Gu X, Jiao Y, et al. Adopting machine learning to predict nomogram for small incision lenticule extraction (SMILE). *Int Ophthalmol.* 2025;45(1): 175. https://doi.org/10.1007/s10792-025-03520-7
12. Park S, Kim H, Kim L, et al. Artificial intelligence-based nomogram for small-incision lenticule extraction. *Biomed Eng Online.* 2021;20(1): 38. https://doi.org/10.1186/s12938-021-00867-7.

Информация об авторах
Кечин Евгений Владимирович — к.м.н., магистр прикладных математики и физики, начальник отдела реализации инновационных программ, трансфера и коммерциализации технологий ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, доцент кафедры общей врачебной практики и поликлинической терапии ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, evgeny.kechin@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6732-1226
Дога Александр Викторович — д.м.н., профессор, alexander_doga@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2519-8941

Information about the authors
Evgeny V. Kechin — Candidate of Medical Sciences, Master of Applied Mathematics and Physics, Head of the Department for Implementation of Innovation Programs, Transfer and Commercialization of Technologies, S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, Associate Professor of the Department of General Medical Practice and Polyclinic Therapy, FSBEI FPE RMACPE MOH Russia, evgeny.kechin@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6732-1226
Alexander V. Doga — Doctor of Medical Sciences, Professor, alexander_doga@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2519-8941

Вклад авторов:
Кечин Е.В. — существенный вклад в концепцию и дизайн работы, сбор, анализ и обработка материала, статистическая обработка данных, написание текста.
Дога А.В. — существенный вклад в концепцию и дизайн работы, редактирование, окончательное утверждение версии, подлежащей публикации.

Authors' contribution:
Kechin E.V. — significant contribution to the concept and design of the work, collection, analysis and processing of material, statistical data processing, text writing.
Doga A.V. — significant contribution to the concept and design of the work, editing, final approval of the version to be published.

Финансирование: Авторы не получали конкретный грант на это исследование от какого-либо финансирующего агентства в государственном, коммерческом и некоммерческом секторах.
Financial transparency: The authors have not declared a specific grant for this research from any funding agency in the public, commercial, or non-profit sector.

Конфликт интересов: Отсутствует.
Conflict of interest: None.

Поступила: *03.04.2026*
Переработана: *26.04.2026*
Принята к печати: *05.05.2026*
Received: *03.04.2026*
Revision: *26.04.2026*
Accepted: *05.05.2026*