

Модели искусственной нейронной сети для расчета оптической силы интраокулярных линз: сравнение с формулами четвертого поколения

А.А. Арзамасцев^{1,2✉}, О.Л. Фабрикантов², Н.А. Зенкова³, А.А. Чикина²

¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская площадь, д. 1, Воронеж, 394018, Россия

² ФГАУ НМИЦ «Межотраслевой научно-технический комплекс «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Федорова», Тамбовский филиал, Рассказовское шоссе, д. 1, Тамбов, 392000, Россия

³ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, д. 33, Тамбов, 392036, Россия

Цель работы — разработка модели для предоперационного расчета оптической силы интраокулярных линз (ИОЛ) на основе искусственных нейронных сетей (ИНС-модель) с открытой архитектурой, обучение модели на локальных эмпирических данных и сравнение погрешности модели с современными формулами четвертого поколения. **Материал и методы.** Исходный датасет представлял собой обезличенные данные пациентов Тамбовского филиала «МНТК «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Федорова» и содержал 890 записей, включающих рефракцию сильного и слабого меридиана роговицы до операции, длину глаза, глубину передней камеры, толщину хрусталика, А-константу используемой модели ИОЛ. В качестве выходной величины выбрана требуемая оптическая сила ИОЛ. Для разработки ИНС-моделей использовали фреймворки машинного обучения языка Python. Все технологические процессы осуществляли в Google Colaboratory. Для оценки качества ИНС-моделей использовали среднюю относительную погрешность и процент попадания расчетных значений в целевой диапазон $\pm 0,5$ дптр. **Результаты.** На значительном количестве локальных данных оценена точность формул четвертого поколения, используемых для предоперационного расчета оптической силы ИОЛ: Barrett Universal II, Hill-RBF, Kane и Pearl DGS. Средняя относительная погрешность составляет 2,67–3,21 %, процент попаданий расчетных значений в диапазон $\pm 0,5$ дптр — от 55 до 68 %. ИНС-модель на основе машинного обучения позволяет проводить расчет данного показателя с погрешностью 2,33 % при попадании расчетных значений в целевой диапазон порядка 74 %. **Заключение.** Разработанная ИНС-модель может быть использована в системах поддержки принятия решений врачами-офтальмологами в виде специализированного калькулятора.

Ключевые слова: оптическая сила интраокулярной линзы; система искусственного интеллекта; искусственные нейронные сети; машинное обучение; медицинские данные; датасет

Конфликт интересов: отсутствует.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Для цитирования: Арзамасцев А.А., Фабрикантов О.Л., Зенкова Н.А., Чикина А.А. Модели искусственной нейронной сети для расчета оптической силы интраокулярных линз: сравнение с формулами четвертого поколения. Российский офтальмологический журнал. 2025; 18 (3 Приложение): 16-9. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2025-18-3-supplement-16-19>

The models of artificial neural network for intraocular lens power calculation. Comparison with fourth-generation formulas

Alexander A. Arzamastsev^{1,2✉}, Oleg L. Fabrikantov², Natalya A. Zenkova³, Angelina A. Chikina²

¹ Voronezh State University, 1, Universitetskaya square, Voronezh, 394018, Russia

² S.N. Fedorov Tambov National medical research center “MNTK Eye Microsurgery”, 1, Rasskazovskoe highway, Tambov, 392000, Russia

³ Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 33, Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russia
arz_sci@mail.ru

Purpose of the study — to develop a model for preoperative calculation of the optical power of intraocular lenses (IOLs) based on artificial neural networks (ANN model) with open architecture, its machine learning on local empirical data and comparison of the model error with modern fourth-generation formulas. **Materials and methods.** The initial dataset included anonymized data of patients of S.N. Fedorov Tambov branch of National medical research center “MNTK Eye Microsurgery”, and contained 890 records, including refraction of the strong and weak cornea meridians before surgery, axial length, anterior chamber depth, lens thickness, and A-constant of the IOL model used. The required optical power of the IOL was selected as the output value. To develop ANN models, standard machine learning tools of the Python language were used, as well as gradient and gradient-free methods of the author’s development, which were used in interactive mode. All technological processes were carried out in Google Colaboratory. To assess the quality of ANN models, we used the average relative error and the percentage of calculated values falling within the target range of $\pm 0.5 D$. **Results.** The accuracy of fourth-generation formulas used for preoperative calculation of the optical power of IOLs — Barrett Universal II, Hill-RBF, Kane and Pearl DGS was assessed using a significant amount of local data. The average relative error is 2.67–3.21 %, the percentage of calculated values falling within the range of $\pm 0.5 D$ is from 55 to 68 %. An ANN model based on machine learning has been developed, which allows calculating this indicator with an error of 2.33 %, with the percentage of calculated values falling within the target range of about 74 %. **Conclusion.** The developed ANN model can be used in decision support systems for ophthalmologists in the form of a specialized calculator.

Keywords: intraocular lens optical power; artificial intelligence system; artificial neural networks; machine learning; medical data; dataset

Conflict of interest: there is no conflict of interest.

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

For citation: Arzamastsev A.A., Fabrikantov O.L., Zenkova N.A., Chikina A.A. The models of artificial neural network for intraocular lens power calculation. Comparison with fourth-generation formulas. Russian ophthalmological journal. 2025; 18 (3 Supplement): 16-9 (In Russ.). <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2025-18-3-supplement-16-19>

Для предоперационного расчета интраокулярных линз (ИОЛ) в офтальмологической практике используют формулы различных поколений, такие как SRK II, SRK/T, Hoffer-Q, Holladay II, Haigis и Barrett. Наибольшей точностью обладают формулы четвертого поколения, разработанные с использованием систем искусственного интеллекта (ИИ), наиболее известными из которых являются Barrett Universal II, Hill-RBF, Kane и Pearl DGS. Они доступны в виде специализированных онлайн-калькуляторов, однако их структура и коэффициенты остаются скрытыми от пользователей, что затрудняет анализ влияния исходных параметров на результат и препятствует их использованию и встраиванию в системы поддержки принятия решений в офтальмологии. По этой причине разработка инструментария на основе современных систем ИИ, позволяющего увеличить точность расчетов оптической силы ИОЛ и повысить процент попаданий расчетных значений в целевой диапазон $\pm 0,5$ дптр путем адаптации математических моделей к локальным эмпирическим данным, является актуальной задачей.

Имеется ряд работ, посвященных сравнению классических формул для расчетов оптической силы ИОЛ, а также изучению целесообразности использования для этой цели современных систем ИИ, основанных на машинном обуче-

нии [1–3]. Показано, что в большинстве случаев формула Kane обеспечивала наименьшую среднюю абсолютную ошибку [1], хотя формула Barrett Universal II обладала самой низкой средней и медианной абсолютной ошибкой прогноза [2], поэтому авторы пришли к выводу, что точность методов машинного обучения сопоставима с точностью формулы Barrett Universal II; но требуется адаптация формул путем оптимизации их коэффициентов на основе локальных данных [3].

ЦЕЛЬ работы — разработка модели для предоперационного расчета оптической силы ИОЛ на основе искусственных нейронных сетей (ИНС-модель) с открытой архитектурой, обучение модели на локальных эмпирических данных и сравнение ее погрешности с современными формулами четвертого поколения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для разработки ИНС-модели и ее параметрической идентификации использовали датасет, состоящий из 890 обезличенных записей пациентов Тамбовского филиала «МНТК “Микрохирургия глаза” им. академика С.Н. Федорова». Для получения ИНС-моделей, аппроксимирующих поведение формул Barrett Universal II, Hill-RBF, Kane, Pearl DGS, использовали по 400 первых записей входных дан-

Таблица. Сравнение расчетов оптической силы ИОЛ для ИНС-модели и формул четвертого поколения на локальных данных
Table. Comparison of IOL optical power calculations for the ANN model and fourth-generation formulas on local data

ИНС-модель или формула, год опубликования ANN model or formula, year of publication	Средняя относительная погрешность, % Average relative error, %	Попадание расчетной величины в диапазон $\pm 0,5$ дптр, % The calculated value falls within the range of ± 0.5 D, %	Максимальная относительная погрешность, % Maximum relative error, %	Число записей, на которых получен результат Number of records on which the result was obtained
Barrett Universal II, 2019	2,67	67,8	64,3	400
Hill-RBF, 2020	2,75	63,0	71,4	400
Kane, 2017	2,78	55,3	71,4	400
Pearl DGS, 2021	3,21	64,5	71,4	400
ИНС-модель, ANN model, 2024–2025	2,33	74,6	44	800*

Примечание. * — ИНС-модель обучали на 70 % случайных записей от 890 (623 записи), ее погрешность оценивали на 30 % от 890 (267 записей) + 533 дополнительные записи, не входящие в обучающий набор, так что их общее число было равно 800.

Note. * — the ANN model was trained on 70 % random records from 890 (623 records), its error was estimated on 30 % of 890 (267 records) + 533 additional records not included in the training set, so that their total number was 800.

ных (из 890) и путем их ввода в online-калькуляторы получали расчетную оптическую силу ИОЛ. Таким образом, датасеты для обучения аппроксимирующих ИНС-моделей состояли из 400 записей, входные значения которых представляли обезличенные предоперационные параметры пациентов, а выходной величиной являлась оптическая сила ИОЛ, рассчитанная по соответствующему калькулятору. Требуемую оптическую силу ИОЛ определяли путем анализа рефракционных ошибок после диагностического обследования, включающего рефрактометрию и определение остроты зрения прооперированного глаза через 1–3 мес после имплантации ИОЛ. Данный период контрольного обследования был выбран исходя из того, что к этому времени послеоперационные показатели рефракции артефактичного глаза, как правило, стабилизируются, а фиброз задней капсулы хрусталика, оказывающий влияние на оптические результаты, еще не успевает развиваться.

Структура датасетов для обучения всех моделей имела следующий вид. Входными данными служила рефракция сильного и слабого меридиана роговицы до операции, длина глаза, глубина передней камеры, толщина хрусталика, А-константа используемой модели ИОЛ, а целевыми значениями — требуемая величина оптической силы ИОЛ (для ИНС-модели) и расчетные значения оптической силы ИОЛ, полученные из соответствующих онлайн-калькуляторов (для аппроксимирующих моделей калькуляторов). В качестве выходной величины выбрана требуемая оптическая сила ИОЛ.

ИНС-модель. Архитектура модели базируется на разложении функции многих переменных в ряд Тейлора. Использование данного приема позволяет создавать относительно простые модели, обладающие хорошей способностью к генерализации [4]. Это свойство достигается за счет малого числа оптимизируемых коэффициентов, что особенно важно при небольших датасетах. Отличительной особенностью таких моделей является то, что вместо традиционно используемых функций активации нейронов, таких как различные виды сигмоидов, гиперболический тангенс или ReLu, здесь используются линейная, квадратическая, кубическая и т. д. передаточные функции, что, по сути, позволяет отнести их к классу множественной регрессии. Данное обстоятельство позволяет избавиться от таких негативных явлений, как переобучение, наличие малофункциональных или нефункциональных областей модели, проблемы исчезающего градиента, а также снизить общее время машинного обучения за счет упрощения архитектуры сети и меньшего числа оптимизируемых коэффициентов. Указанный вид ИНС-моделей прошел апробацию в нашей работе [4] и показал хорошие свойства

генерализации при разработке нейронных сетей для расчетов оптической силы ИОЛ.

Для обучения всех ИНС-моделей использовали градиентные методы спуска, а также безградиентные — покоординатного спуска и Монте-Карло, реализованные средствами Python в Google Colaboratory. Оценку точности ИНС-моделей проводили по средней относительной погрешности и проценту попадания расчетных значений оптической силы ИОЛ в диапазон $\pm 0,5$ дптр. Валидацию ИНС-моделей проводили обычными способами, разделив обучающую выборку в отношении 0,7 (обучение): 0,3 (валидация). Все технологические процессы с моделями проводили с использованием средств языка Python в Google Colaboratory.

После проведения вычислительных экспериментов по влиянию входных параметров на точность ИНС-модели были выделены пять наиболее существенных: рефракция сильного меридиана роговицы до операции (дптр), рефракция слабого меридиана роговицы до операции (дптр), оптическая длина глаза (мм), глубина передней камеры (мм), толщина хрусталика (мм). В качестве дополнительного параметра принята А-константа используемой модели ИОЛ, так что общее число входных параметров оказалось равно шести.

При обучении ИНС-моделей использовали следующие целевые функции: 1) сумма квадратов отклонений расчетных и эмпирических значений оптической силы ИОЛ и 2) процент попаданий расчетных значений в сравнении с эмпирическими в диапазон $\pm 0,5$ дптр. В первом случае при обучении модели целевая функция минимизировалась за счет изменения ее коэффициентов, во втором — максимизировалась.

В таблице приведено сравнение полученной ИНС-модели с формулами четвертого поколения на локальных данных. По величине средней относительной погрешности она незначительно превосходит классические формулы, обеспечивая при этом существенно больший процент попаданий расчетных значений в целевой диапазон $\pm 0,5$ дптр, важный для офтальмологов, и меньшие значения максимальной относительной погрешности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана ИНС-модель для предоперационного расчета оптической силы ИОЛ, обучение которой осуществлено на локальных эмпирических данных. Средняя относительная погрешность модели составляет 2,33 % при проценте попаданий расчетных значений в целевой диапазон $\pm 0,5$ дптр порядка 74 %. Это несколько улучшает результаты, полученные по формулам четвертого поколения для предоперационного

расчета оптической силы ИОЛ: Barrett Universal II, Hill-RBF, Kane и Pearl DGS, средняя относительная погрешность которых составляет 2,67–3,21 %, а процент попаданий расчетных значений в диапазон $\pm 0,5$ дптр — от 55 до 68 %. Разработанная ИНС-модель может быть использована в системах поддержки принятия решений врачами-офтальмологами в виде специализированного калькулятора.

Литература/References

1. StopyraW, Cooke DL, Grzybowski AA. Review of intraocular lens power calculation formulas based on artificial intelligence. *Journal of Clinical Medicine*. 2024; 13, 498. <https://doi.org/10.3390/jcm13020498>

2. Yamauchi T, Tabuchi T, Takase K, Masumoto H. Use of a machine learning method in predicting refraction after cataract surgery. *Journal of Clinical Medicine*. 2021; 10, 1103. doi: 10.3390/jcm10051103
3. Kuthirummal N, Vanathi M, Mukhija R, et al. Evaluation of Barrett universal II formula for intraocular lens power calculation in Asian Indian population. *Indian J. Ophthalmol*. 2020; 68 (1): 59–64. doi: 10.4103/ijo.IJO_600_19
4. Арзамасцев А.А., Фабрикантов О.Л., Зенкова Н.А., Беликов С.В. Применение технологии машинного обучения для прогнозирования оптической силы интраокулярных линз: генерализация диагностических данных. *Digital Diagnostics*. 2024. 5 (1): 53–63. [Arzamastsev A.A., Fabrikantov O.L., Zenkova N.A., Belikov S.V. Application of machine learning technology to predict the optical power of intraocular lenses: generalization of diagnostic data. *Digital Diagnostics*. 2024. 5 (1): 53–63 (In Russ.)]. doi: <https://doi.org/10.17816/DD623995>

Вклад авторов в работу: А.А. Арзамасцев — обработка данных, разработка модели и анализ результатов; О.Л. Фабрикантов — концепция и дизайн исследования; Н.А. Зенкова — сбор и обработка данных, написание текста; А.А. Чикина — сбор и обработка данных.

Authors' contribution: A.A. Arzamastsev — data processing, model development and results analysis; O.L. Fabrikantov — study concept and design; N.A. Zenkova — data collection and processing, writing of the article; A.A. Chikina — data collection and processing.

Поступила: 27.06.2025. Переработана: 24.07.2025. Принята к печати: 25.07.2025
Originally received: 27.06.2025. Final revision: 24.07.2025. Accepted: 25.07.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская площадь, д. 1, Воронеж, 394018, Россия

² ФГАУ НМИЦ «Межотраслевой научно-технический комплекс «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Федорова», Тамбовский филиал, Рассказовское шоссе, д. 1, Тамбов, 392000, Россия

Александр Анатольевич Арзамасцев — д-р техн. наук, профессор кафедры математического и прикладного анализа¹, научный сотрудник²

Олег Львович Фабрикантов — д-р мед. наук, профессор, директор²

Ангелина Андреевна Чикина — врач-офтальмолог²

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, д. 33, Тамбов, 392036, Россия

Наталья Александровна Зенкова — канд. псих. наук, доцент, доцент кафедры математического моделирования и информационных технологий

Для контактов: Александр Анатольевич Арзамасцев,
arz_sci@mail.ru

¹ Voronezh State University, 1, Universitetskaya square, Voronezh, 394018, Russia

² S.N. Fedorov Tambov National medical research center “MNTK Eye Microsurgery”, 1, Rasskazovskoe highway, Tambov, 392000, Russia

Alexander A. Arzamastsev — Dr. of Tech. Sci., professor of the department of mathematical and applied analysis¹, scientific researcher²

Oleg L. Fabrikantov — Dr. of Med. Sci., professor, director²

Angelina A. Chikina — ophthalmologist²

Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 33, Internatsionalnaya St., Tambov, 392036, Russia

Natalya A. Zenkova — Cand. of Psychol. Sci., associate professor of chair of mathematical modeling and information technology

For contacts: Alexander A. Arzamastsev,
arz_sci@mail.ru