

Совершенствование диагностики посткератотомической деформации роговицы с использованием методов искусственного интеллекта для оптимизации расчета интраокулярных линз

Е.К. Цыренжапова¹✉, О.И. Розанова^{1,2}, И.М. Михалевич², И.С. Розанов³

¹ ФГАУ НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, Иркутский филиал, ул. Лермонтова, д. 337, Иркутск, 664033, Россия

² Иркутская государственная медицинская академия последипломного образования — филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, мкрн Юбилейный, д. 100, Иркутск, 664049, Россия

³ ООО «Транснефть-Технологии», ул. 3-я Песчаная, д. 2а, Москва, 125252, Россия

Посткератотомическая деформация роговицы (ПКДР) создает значительную сложность при расчете интраокулярных линз (ИОЛ). Традиционные методы оценки топографии роговицы могут быть подвержены субъективным ошибкам, что диктует необходимость разработки автоматизированных решений на основе искусственного интеллекта (ИИ). Цель работы — разработка и валидация нейросетевой модели для автоматизированного анализа топографических данных роговицы с целью повышения точности расчета ИОЛ у пациентов с ПКДР. Материал и методы. Использованы обезличенные результаты медицинской документации 450 пациентов (возраст от 45 до 78 лет) в отдаленном периоде после радиальной кератотомии (РК), из них 95 пациентов были прооперированы по поводу катаракты. Всем пациентам помимо стандартного офтальмологического обследования проведена шеймпфлюг-визуализация роговицы (Pentacam HR, Oculus, Германия). Использованы многофакторные методы анализа, разработан математический алгоритм классификации. Результаты. Разработанный прототип нейросетевой модели способен автоматически классифицировать топографические данные роговицы на шесть типов. На основании послеоперационных рефракционных данных рассчитан прогнозируемый рефракционный результат и поправочные коэффициенты для расчета ИОЛ по различным формулам. Заключение. Технологии ИИ и база поправочных коэффициентов могут стать основой для оптимизированного расчета оптической силы ИОЛ у пациентов с ПКДР.

Ключевые слова: передняя радиальная кератотомия; искусственный интеллект; машинное обучение; рельеф-топография роговицы; расчет ИОЛ

Конфликт интересов: отсутствует.

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

Для цитирования: Цыренжапова Е.К., Розанова О.И., Михалевич И.М., Розанов И.С. Совершенствование диагностики посткератотомической деформации роговицы с использованием методов искусственного интеллекта для оптимизации расчета интраокулярных линз. Российский офтальмологический журнал. 2025; 18 (3 Приложение): 37–42. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2025-18-3-supplement-37-42>

Improving the diagnosis of postkeratotomic corneal deformity using artificial intelligence methods to optimize the calculation of intraocular lenses

Ekaterina K. Tsyrenzhapova¹✉, Olga I. Rozanova^{1,2}, Isai M. Mikhalevich², Ivan S. Rozanov³

¹ Irkutsk Branch of S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, 337, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia

² Irkutsk State Medical Academy of Postgraduate Education, 100, micro district Ubileiny, Irkutsk, 664049, Russia

³ LLC "Transneft Technologies", 2A, 3d Peschanaya St., Moscow, 125252, Russia
katyakel@mail.ru

*Postkeratotomy corneal deformation (PKCD) has significant complexity in the calculation of intraocular lenses (IOL). Traditional methods of corneal topography assessment have errors, which dictates the need to develop automated solutions based on artificial intelligence (AI). **Purpose:** to develop and validate a neural network model for automated analysis of corneal topographic data in order to improve the accuracy of IOL calculation in patients with PKRD. **Materials and methods.** Anonymized results of medical records of 450 patients (aged 45 to 78 years) in the late period after radial keratotomy (RK) were used (95 patients underwent cataract surgery). In addition to the standard ophthalmological examination, all patients underwent Scheimpflug-imaging (Pentacam HR, Oculus, Germany). Multivariate analysis methods were carried out, a mathematical classification algorithm was developed. **Results.** The developed prototype of the neural network model is able to automatically classify corneal topographic data into six types. Based on the postoperative refractive data, the predicted refractive result and correction factors for calculating the IOL using various formulas were calculated. **Conclusion.** AI technologies and the correction factor database can become the basis for optimized calculation of the IOL optical power in patients with PCDR.*

Keywords: anterior radial keratotomy; artificial intelligence; machine learning; corneal relief topography; IOL calculation

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: Tsyrenzhapova E.K., Rozanova O.I., Mikhalevich I.M., Rozanov I.S. Improving the diagnosis of postkeratotomic corneal deformity using artificial intelligence methods to optimize the calculation of intraocular lenses. Russian ophthalmological journal. 2025; 18 (3 Supplement): 37-42 (In Russ.). <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2025-18-3-supplement-37-42>

Преимущества технологий искусственного интеллекта (ИИ) позволяют анализировать большие объемы данных, повышая точность диагностики и эффективность лечения [1–4].

Посткератотомическая деформация роговицы (ПКДР) характеризуется изменением профиля как передней, так и задней поверхностей роговицы с изменением ее биомеханических и денситометрических параметров. При этом характер корнеальных изменений в отдаленном периоде крайне вариабелен, клинический протокол ведения данной категории пациентов как таковой отсутствует. С учетом многовариантности клинических, оптических и биомеханических характеристик ПКДР важным направлением решения данной проблемы является создание системы классификации этого патологического состояния. Этот вопрос становится особенно важным при необходимости хирургического лечения катаракты и определения оптической силы интраокулярной линзы (ИОЛ), так как множественные рубцы, деформирующие роговицу, осложняют техническое проведение хирургического вмешательства, а формулы расчета ИОЛ в данной ситуации некорректны. Разработанные ранее эмпирические поправки формул расчета (Masket; Wang — Koch — Maloney; Shammas-PL) для пациентов, перенесших фоторефракционные операции, учитывают стандартизированное изменение переднего профиля роговицы после ЛАСИК и фоторефракционной кератэктомии (ФРК) и неприменимы после радиальной кератотомии (РК). Согласно современным исследованиям, данные поправки дают еще большие ошибки, чем классические формулы [5].

Предыдущие результаты наших исследований выявили наличие шести топографических типов деформации роговицы, которые различаются по паттернам элевационной картины передней и задней поверхностей роговицы и их комбинациям [6]. Разработанная искусственная нейронная сеть (ИНС), способная анализировать элевационные показатели топографической карты, продемонстрировала высокую эффективность в классификации типов ПКДР, что свидетельствует о значительном потенциале для дальнейшей оптимизации и повышения точности работы нейросетевой модели. В то же время остаются неясными процессы стандартизации классификации, совершенствование алгоритмов лечения данной категории пациентов, а также ее клиническая значимость.

ЦЕЛЬ работы — разработка и валидация нейросетевой модели для автоматизированного анализа топографических данных роговицы с целью повышения точности расчета ИОЛ у пациентов с ПКДР.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для анализа использованы обезличенные результаты медицинской документации 450 пациентов в возрасте от 45 до 78 лет, перенесших ранее РК и обратившихся в Иркутский филиал ФГАУ НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Федорова» в период 2020–2025 гг., из них 95 пациентов были прооперированы по поводу катаракты (длительность наблюдения — 12 мес). Всем пациентам помимо стандартного офтальмологического об-

следования проведена шеймпфлюг-визуализация роговицы (Pentacam HR, Oculus, Германия), измерения проводились трижды, в разные визиты для исключения случайных колебаний. Для расчета оптической силы ИОЛ использованы данные кератометрического эквивалента протокола Holladay EKR в центральной зоне 3 мм. В случаях большого колебания показателей кератометрии использовались средние значения.

Разработка модели состояла из нескольких этапов.

1. Формирование набора данных элевации передней и задней поверхностей роговицы (обработано 500 топографических карт, проанализировано 19 численных параметров для передней и задней поверхности роговицы).

2. Классификация топографических типов ПКДР с использованием пошагового многомерного дискриминантного анализа.

3. Создание модели машинного обучения для автоматической классификации согласно численным значениям элевационных показателей. Для программирования использовался язык Python 3.10 с дистрибутивом Anaconda, в частности библиотека tf.keras 2.12.0. Использована реализация спецификации Keras API в рамках фреймворка TensorFlow версии 2.0.

4. Анализ рефракционных ошибок проведен через 12 мес после хирургического лечения катаракты с вычислением рефракционной ошибки (РО) и рефракционной прогнозируемой ошибки (РПО) при определении оптической силы ИОЛ по основным формулам расчета ESCRS (<https://iolcalculator.es CRS.org>), Barrett TRU K (www.apacrs.org), формуле MIKOFRK (www.mntk.ru), EVO 2.0, Kane

и PEARL-DGS (<https://iolcalculator.es CRS.org>). Величина РО соответствовала послеоперационному сферозэквиваленту после перевода из очковой плоскости в плоскость ИОЛ. Величина РПО рассчитана как разница между оптической силой ИОЛ, необходимой для достижения эметропии по достигнутым послеоперационным результатам, и оптической силой ИОЛ, рассчитанной по формуле на эметропию.

5. Анализ математического прогнозирования результатов послеоперационной рефракции и расчет поправочных коэффициентов в зависимости от топографического типа ПКДР.

Статистический анализ проведен с применением компьютерной программы Statistica 8.0. Для статистического анализа были использованы параметры правого глаза.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе проведен анализ элевационной топографии передней и задней поверхностей роговицы. Установлено, что правильный посткератотомический профиль — с наличием замкнутого или незамкнутого кольца выпячивания периферической части роговицы и провалом центральной части роговицы — присутствует в 87 % случаев. Неправильный профиль с нерегулярными провалами в высоте роговицы был выявлен в 13 % случаев. При этом в 25 % случаев выявлено смещение оптического центра. В зависимости от элевационных изменений роговицы определены следующие паттерны выпячивания ее периферической части: в виде замкнутого кольца, незамкнутого кольца и иррегулярного типа, который кодировался как ключевой параметр type (рис. 1).

Тип деформации Type	Паттерн элевации передней поверхности роговицы Anterior corneal elevation pattern	Паттерн элевации задней поверхности роговицы Posterior corneal elevation pattern
1	 Незамкнутое кольцо * Incomplete ring	 Незамкнутое кольцо * Incomplete ring
2	 Замкнутое кольцо * Complete ring	 Незамкнутое кольцо * Incomplete ring
3	 Замкнутое кольцо * Complete ring	 Замкнутое кольцо * Complete ring
4	 Незамкнутое кольцо * Incomplete ring	 Замкнутое кольцо * Complete ring
5	 Иррегулярный Irregular	 Иррегулярный Irregular
6	 Незамкнутое кольцо либо замкнутое кольцо * Incomplete ring or complete ring	 Иррегулярный, присутствует существенное смещение по высоте, свыше 80 мкм Irregular, with significant elevation displacement exceeding 80 µm

Рис. 1. Тип — классификационный тип ПКДР. * — элевация не превышает 80 мкм

Fig. 1. Type — the classification type of the postkeratotomy corneal deformation (PKCD). * — elevation not more 80 µm

Таблица 1. Матрица наиболее информативных показателей в дискриминационной модели
Table 1. Matrix of the most informative indicators in discrimination model

Параметры Parameters	Лямбда Уилкса Wilks Lambda	F-критерий F-criterion	p-уровень p-level
Элевация задней поверхности (2-я точка), мкм Elevation of the posterior surface (2 points), μm	0,0436	0,813	0,000007
Элевация задней поверхности (4-я точка), мкм Elevation of the posterior surface (4 points), μm	0,0418	0,8515	0,0001
Элевация задней поверхности (8-я точка), мкм Elevation of the posterior surface (8 points), μm	0,0413	0,8633	0,0004
Элевация задней поверхности (14-я точка), мкм Elevation of the posterior surface (14 points), μm	0,0391	0,9103	0,0131
Максимальная элевация задней поверхности в центре, мкм Maximum elevation of the posterior surface in the center, μm	0,0558	0,6385	0,0000
Максимальная элевация задней поверхности на периферии (диаметр 6 мм), мкм Maximum elevation of the posterior surface at the periphery (diameter 6 mm), μm	0,0579	0,6157	0,0000
Кератометрия передней поверхности роговицы, дптр Keratometry of the anterior corneal surface, D	0,0502	0,7097	0,0000
Кератометрия задней поверхности роговицы, дптр Keratometry of the posterior corneal surface, D	0,0406	0,8770	0,001

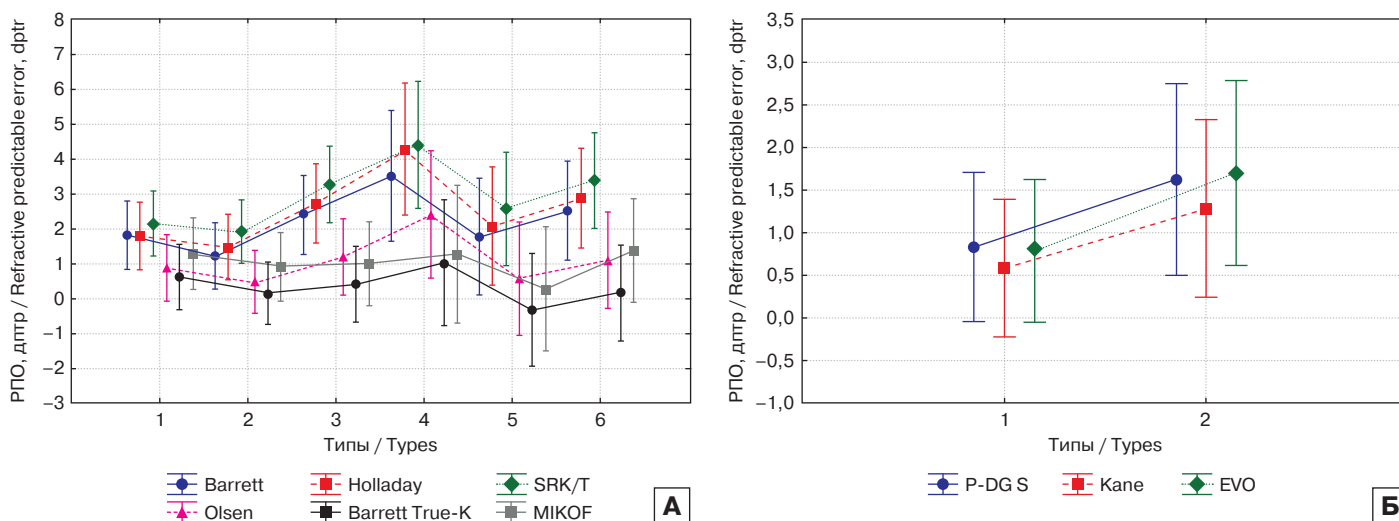


Рис. 2. Дисперсионный анализ ANOVA значений РПО в зависимости от типа ПКДР: А — по основным формулам расчета ИОЛ; Б — по формулам расчета ИОЛ на основе ИИ
Fig. 2. Analysis of variance ANOVA in refractive predictable error depending on the type of PKCD: А — according to the basic formulas IOL calculation; Б — according to the AI formulas IOL calculation

Таблица 2. Поправочные коэффициенты при расчете оптической силы ИОЛ согласно средним значениям РПО
Table 2. Correction factors for IOL calculation according to the refractive predicted error average values

Формулы Formulas	1-й тип 1 type	2-й тип 2 type	3-й тип 3 type	4-й тип 4 type	5-й тип 5 type	6-й тип 6 type
Кератометрия, дптр Keratometry, dptr	37,4–39,5	37,1–37,6	34,8–35,6	35,6–37,8	32,1–39,5	32,2–35,9
Barrett U	–1,84	–2,22	–2,42	–2,48	–1,77	–2,52
Holladay	–1,86	–1,42	–2,81	–3,21	–2,10	–2,86
SRK/T	–2,30	–1,79	–3,42	–3,17	–2,67	–3,40
Olsen	–0,72	–0,44	–1,16	–2,27	–0,63	–1,03
Barrett True-K	–0,54	–1,38	–0,35	–0,40	–0,72	–0,36
MIKOF RK/ALF	–1,26	–0,69	–0,91	–0,62	–0,35	–1,57
P-DGS	–0,82	–1,60	При кератометрических показателях менее 37 дптр формулы неприменимы Formulas are not valid for keratometric readings under 37 D			
Kane	–0,57	–1,20				
EVO	–0,77	–1,41				

Для подтверждения данной классификации был проведен дискриминантный анализ, который показал высокую значимость модели (лямбда Уилкса = 0,00022; $F(90,1163) = 60,774$; $p = 0,0001$). Ключевыми параметрами дискриминации, оцененными по F-критерию Фишера, являются показатели элевации задней поверхности роговицы с общим вкладом 63 % (табл. 1).

Далее была разработана нейросеть прямого распространения с тремя слоями: входным (12 нейронов), скрытым (14 нейронов) и выходным (6 нейронов). В результате получен алгоритм классификации ПКДР по шести топографическим типам ПКДР с функцией автоматической проверки. После 200 эпох машинного обучения ИНС модель достигла точности 91 %.

На следующем этапе проанализированы результаты хирургического лечения катаракты и выполнены расчеты РПО с использованием различных формул. Анализ показал, что в 90 % случаев наблюдается гиперметропическое смещение РПО при использовании большинства формул. Наибольшая точность прогнозирования рефракционного результата достигнута с формулой Barrett True-K. При проведении расчетов по формулам на основе алгоритмов ИИ и с учетом требуемых минимальных величин кератометрии (37 дптр и более) удалось выполнить аналогичное определение РПО только для пациентов с 1-м и 2-м типом ПКДР, где также установлена тенденция к гиперметропическому шифту (рис. 2). На основании полученных средних значений РПО вычислены поправочные коэффициенты расчета оптической силы ИОЛ в зависимости от топографического типа ПКДР (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

По данным рельеф-топографии установлено, что правильный посткератотомический профиль — с наличием замкнутого или незамкнутого кольца выпячивания периферической части роговицы и провалом центральной части роговицы — присутствует в 89 % случаев. С учетом характера деформации передней и задней корнеальных поверхностей определены шесть топографических типов ПКДР, что подтверждено результатами математического анализа.

Клиническая значимость представленной классификации верифицирована при анализе отдаленных рефракционных результатов хирургии катаракты у пациентов данной категории. Величины прогнозируемой рефракции у пациентов с различными топографическими типами ПКДР различаются. При анализе послеоперационной РПО установлено, что наиболее благоприятными для точного расчета ИОЛ являются 1, 2, 3-й топографические типы ПКДР, наименее благоприятными — 5-й и 6-й типы, что связано с более грубой деформацией роговицы и ее биомеханической нестабильностью. Так, достижение желаемой рефракции было отмечено в 61,9–72,4 % случаев при 1, 2 и 3-м типах ПКДР, в 33 % случаев — при 4-м типе, в 24 % случаев — при 5-м типе и в 16 % случаев — при 6-м типе ПКДР. Результаты исследования подчеркивают целостность дифференциации топографических типов ПКДР в клинической практике и необходимость включения шеймпфлюг-визуализации в скрининговый этап диагностики данной категории пациентов.

Представленная классификация является первой попыткой систематизации топографических вариантов деформации роговицы у пациентов, перенесших радиальную кератотомию. В исследовании также продемонстрирована перспективность применения ИИ для автоматизированного анализа данных топографии роговицы у пациентов с ПКДР. Разработанная нейронная сеть показала точность 91 % и обладает потенциалом для дальнейшего совершенствования. В перспективе это позволит создать индивидуальный протокол ведения пациентов, нацеленный на достижение оптимального рефракционного результата при выполнении хирургии катаракты.

Вместе с тем наше исследование имеет ряд ограничений: 1) объем выборки недостаточен для построения полноценной модели машинного обучения; 2) при прогностическом анализе рефракционных ошибок были использованы не все формулы расчета оптической силы ИОЛ; 3) база поправочных коэффициентов основана только на усредненных значениях РПО, без учета точек данных, выделяющихся из общего ряда наблюдений.

В дальнейшем следует расширить выборку участников для повышения статистической мощности и репрезентативности результатов, а также разработки модели ИИ, которая оценивала бы комбинированное применение различных формул расчета оптической силы ИОЛ с учетом данных кератотопографии и разброса ее индивидуальных значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отдаленном периоде после РК установлено шесть топографических типов деформации роговицы. Разработанная модель автоматической классификации ПКДР с применением ИИ имеет точность 91 %. Технологии ИИ и база поправочных коэффициентов могут стать основой для оптимизированного расчета оптической силы ИОЛ у пациентов с ПКДР.

Литература/References

1. Kapoor R, Walters SP, Al-Aswad LA. The current state of artificial intelligence in ophthalmology. *Surv Ophthalmol.* 2019; 64 (2): 233–40. doi:10.1016/j.survophthal.2018.09.002
2. Zéboulon P, Debellemannièr G, Bouvet M, Gatineau D. Corneal topography raw data classification using a convolutional neural network. *Am J Ophthalmol.* 2020; 219: 33–9. doi:10.1016/j.ajo.2020.06.005
3. Moshirfar M, Sperry RA, Altaf AW, Stoakes IM, Hoopes PC. Predictability of existing IOL formulas after cataract surgery in patients with a previous history of radial keratotomy: A retrospective cohort study and literature review. *Ophthalmol Ther.* 2024; 13 (6): 1703–22. doi:10.1007/s40123-024-00946-7
4. Moshirfar M, Ayesha A, Jaafar M, et al. Precision in IOL calculation for cataract patients with prior history of combined RK and LASIK histories. *Clin Ophthalmol.* 2024; 18: 1277–86. doi:10.2147/OPTH.S461988
5. Pan X, Wang Y, Li Z, Ye Z. Intraocular lens power calculation in eyes after myopic laser refractive surgery and radial keratotomy: Bayesian Network Meta-analysis. *American Journal of Ophthalmology.* 2023; 262: 48–61. doi: 10.1016/j.ajo.2023.09.026
6. Цыренжапова Е.К., Розанова О.И., Юрьева Т.Н., Иванов А.А., Розанов И.С. Технологии машинного обучения и искусственной нейронной сети в классификации посткератотомической деформации роговицы. *Digital Diagnostics.* 2024; 5 (1): 64–74. [Tsyrenzhapova E.K., Rozanova O.I., Iureva T.N., Ivanov A.A., Rozanov I.S. Machine-learning and artificial neural network technologies in the classification of postkeratotomy corneal deformity. *Digital Diagnostics.* 2024; 5 (1): 64–74]. <https://doi.org/10.17816/DD624022>

Вклад авторов в работу: Е.К. Цыренжапова — сбор и анализ данных, обзор литературы, написание статьи; О.И. Розанова — концепция и дизайн работы, анализ данных, редактирование, финальное одобрение статьи, И.М. Михалевич — математический анализ, интерпретация данных, редактирование, И.С. Розанов — анализ и обработка данных, математический анализ, создание модели машинного обучения.
Authors' contribution: E.K. Tsyrenzhapova — data collection and analysis, literature review, writing the article; O.I. Rozanova — concept and design of the work, data analysis, editing of the article, final decision on publication; I.M. Mikhalevich — mathematical analysis, data interpretation, editing; I.S. Rozanov — data analysis and processing, mathematical analysis, creation of a machine learning model.

Поступила: 07.07.2025. Переработана: 25.09.2025. Принята к печати: 27.09.2025
Originally received: 07.07.2025. Final revision: 25.09.2025. Accepted: 27.09.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

¹ ФГАУ НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, Иркутский филиал, ул. Лермонтова, д. 337, Иркутск, 664033, Россия

² Иркутская государственная медицинская академия последипломного образования — филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, мкрн Юбилейный, д. 100, Иркутск, 664049, Россия

Екатерина Кирилловна Цыренжапова — канд. мед. наук, врач-офтальмолог 1-го офтальмологического отделения¹, ORCID 0000-0002-6804-8268

Ольга Ивановна Розанова — д-р мед. наук, заведующая научно-образовательным отделом, врач-офтальмолог¹, ассистент кафедры офтальмологии²

Исай Моисеевич Михалевич — канд. геолого-минералогических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики²
ООО «Транснефть-Технологии», ул. 3-я Песчаная, д. 2а, Москва, 125252, Россия

Иван Сергеевич Розанов — программист

Для контактов: Екатерина Кирилловна Цыренжапова,
katyakel@mail.ru

¹ Irkutsk Branch of S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, 337, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia

² Irkutsk State Medical Academy of Postgraduate Education, 100, micro district Ubileiny, Irkutsk, 664049, Russia

Ekaterina K. Tsyrenzhapova — Cand. of Med. Sci., ophthalmologist, 1st ophthalmological department¹, ORCID 0000-0002-6804-8268

Olga I. Rozanova — Dr. of Med. Sci., head of the scientific and educational department, ophthalmologist¹, assistant professor, chair of ophthalmology²

Isai M. Mikhalevich — Cand. of Geology Sci., associate professor, head of chair of computer science²

LLC «Transneft Technologies», 2a, 3d Peschanaya St., Moscow, 125252, Russia

Ivan S. Rozanov — application programmer

For contacts: Ekaterina K. Tsyrenzhapova,
katyakel@mail.ru