

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РИСКА ПРОГРЕССИРОВАНИЯ ПАРОДОНТИТА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ: КОГОРТНОЕ РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

М.Д. Перова^{1*}, Д.Д. Самохвалова¹, А.А. Халафян², В.А. Акиньшина²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. им. Митрофана Седина, д. 4, г. Краснодар, 350063, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет»
ул. Ставропольская, д. 149, г. Краснодар, 350040, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Общепринятыми оценками риска прогрессирования пародонтита в настоящее время являются детерминанты косвенной стабильности: пародонтальные карманы, персистирующая кровоточивость десен, подвижность зубов, локальные факторы риска. В эпоху персонализированной медицины актуальным решением было бы основывать выбор пародонтальной терапии не на широких клинических рекомендациях, а на единовременном рассмотрении максимально доступного спектра индивидуальных показателей с учетом факторов риска.

Цель исследования — определить относительный риск прогрессирования пародонтита после активной базовой терапии у пациентов с помощью нейросетевого моделирования.

Методы. Когортное ретроспективное исследование проведено по данным медицинских карт 109 пациентов обоего пола, в возрасте от 30 до 70 лет, после базового пародонтального лечения хронического пародонтита (легкой, средней и тяжелой степени) в период с 1999 по 2016 год и находившихся на поддерживающей пародонтальной терапии (ППТ) от 5 до 20 лет. В работе учитывались данные объективного обследования опорного аппарата зубов и категориальные показатели (всего 24), оцененные до лечения, через 4–6 месяцев после базового (активного) лечения и в сроки 5 лет $\leq$ ППТ $\leq$ 20 лет. По итогам анализа описательных статистик определены целевые количественные показатели для прогностического моделирования исходов лечения пациентов пародонтитом и определения остаточного риска прогрессирования болезни. Статистическая обработка полученных данных проведена посредством пакета Statistica 13.3 (Tibco, USA). Сравнение средних значений показателей в различные сроки проводили с помощью критериев знаков и Вилкоксона; для оценки связей между предикторами и целевыми показателями использовали коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Во всех случаях анализа принят уровень статистической значимости $p = 0,05$. В качестве инструментария построения нейросетевых моделей использовали автоматизированные нейронные сети DataMining программы Statistica. Решение задачи классификации уровня риска прогрессирования болезни достигнуто проведением ROC AUC анализа. Предсказательную силу модели оценивали при помощи показателей чувствительности и специфичности.

Результаты. В когорте определена неоднородная динамика предикторных переменных, характеризующих состояние опорного аппарата зубов. Исходы регенеративной хирургии пародонта, независимо от пола, возраста пациентов и сопутствующих общих

заболеваний, существенно превосходили таковые при иных подходах за счет формирования нового зубодесневого прикрепления, хотя и в разном объеме. Дополнительный положительный функциональный исход отмечен при восстановлении целостности зубных рядов дентальными имплантатами, без взаимоповреждающих эффектов. Поскольку обнаружение взаимосвязей между показателями не предполагает знака равенства с прогностической ценностью, были построены прогностические модели для целевых показателей и стратификации относительного риска прогрессирования пародонтита с помощью автоматизированных нейронных сетей. Из 1000 автоматически построенных и обученных нейросетей — двухслойных персептронов выбраны сети с наилучшими прогностическими свойствами. Чувствительность модели прогнозирования относительного риска на обучающей, контрольной и тестовой выборках соответствовала 90, 67, 80%; специфичность модели соответствовала 81,481, 85,714, 100%. В целом в исследовательской когорте чувствительность и специфичность составили 85,937 и 86,666%. Площадь под кривой ROC AUC равна 0,859.

Заключение. Использование алгоритма искусственного интеллекта — построения нейронных сетей для целевых предикторов и стратификации относительного риска прогрессирования пародонтита — имеет преимущества перед классическими методами: позволяет решать задачи классификации и регрессии с категориальными и количественными предикторными переменными, используя данные произвольной природы большого и малого объема. Практическая реализация результатов исследования нашла отражение в разработке калькулятора относительного риска на основании написанной программы для ЭВМ.

Ключевые слова: пародонтит, относительный риск, прогностические модели, искусственная нейронная сеть, поддерживающая пародонтальная терапия

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Перова М.Д., Самохвалова Д.Д., Халафян А.А., Акиншина В.А. Определение относительного риска прогрессирования пародонтита с помощью нейросетевого моделирования: когортное ретроспективное исследование. *Кубанский научный медицинский вестник*. 2022; 29(5): 44–62. <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2022-29-5-44-62>

Получена: 08.04.2022

Получена после доработки: 08.07.2022

Принята к публикации: 17.08.2022

ASSESSMENT OF RELATIVE RISK FOR PERIODONTITIS PROGRESSION USING NEURAL NETWORK MODELING: COHORT RETROSPECTIVE STUDY

Marina D. Perova^{1*}, Dina D. Samochvalova¹, Aleksan A. Khalafyan²,
Vera A. Akinshina²

¹Kuban State Medical University
Mitrofana Sedina str., 4, Krasnodar, 350063, Russia

²Kuban State University
Stavropolskaya str., 149, Krasnodar, 350040, Russia

ABSTRACT

Background. Currently accepted risk assessments of periodontitis progression are determinants of indirect stability: periodontal pockets, persistent bleeding of the gums, tooth mobility,

local risk factors. In the era of case-oriented medicine, a relevant solution would be to choose periodontal therapy according to one-time consideration of the maximum available range of individual risk factors rather than on general clinical guidelines.

Objectives. The study was aimed at determining the relative risk of periodontitis progression after active basic therapy using neural network modeling.

Methods. A cohort retrospective study was performed on 109 patients of both sexes, aged 30 to 70 years, after basic treatment of chronic periodontitis (mild, moderate and severe) in the period from 1999 to 2016, who were on supportive periodontal therapy (SPT) for 5 years $\leq \text{SPT} \leq 20$ years. The authors considered data from objective examination of the periodontium and categorical indices (24 in total) assessed before treatment, 4–6 months after basic (active) treatment and 5 years $\leq \text{SPT} \leq 20$ years. Following the analysis of descriptive statistics, target quantitative indices were determined for prognostic modeling of treatment outcomes in periodontitis patients and calculating the residual risk of disease progression. Statistical processing of obtained data was carried out using the Statistica 13.3 package (Tibco, USA). Mean values of the indicators at different time points were compared by means of Wilcoxon's and Signs criteria; Spearman's rank correlation coefficient was used to evaluate relevance between predictors and target indicators. The level of statistical significance $p = 0.05$ was accepted in all cases of analysis. DataMining, an automated neural network of Statistica software, was used as a tool to build neural network models. The task of classifying the level of risk of disease progression was solved by means of ROC analysis. The prognostic potential of the model was assessed using sensitivity and specificity measures.

Results. The heterogeneous dynamics of predictor variables describing the state of the periodontium was determined. The outcomes of regenerative periodontal surgery, regardless of gender, age of patients and comorbidities, significantly outperformed those of other approaches, due to the formation of a new dentogingival attachment, although to different extent. Another positive functional outcome was recorded in restoring the dentition integrity by implantation, without any mutually damaging effects. Since revealing the interrelationships between indicators is not equivalent to the predictive value, prognostic models were built for target indicators and stratification of the relative risk of periodontitis progression using automated neural networks. The networks with the best prognostic properties were selected out of 1000 automatically built and trained neural networks — double-layer perceptrons. The sensitivity of the relative risk prognostic model on the training, control and test samples made up 90%, 67%, 80%; the specificity of the model made up 81.481%, 85.714%, 100%. Overall, in the cohort, the sensitivity and specificity accounted for 85.937% and 86.666%. The area under the curve (ROC AUC) is 0.859.

Conclusion. The use of an artificial intelligence algorithm for the construction of neural networks for target predictors and stratification of the relative risk of periodontitis progression has advantages over classical methods — it is instrumental in solving classification and regression problems with categorical and quantitative predictor variables using data of arbitrary nature of large and small volumes. The practical implementation of the study results is reflected in the development of a relative risk calculator based on a written computer program.

Keywords: periodontitis, relative risk, prognostic models, artificial neural network, supportive periodontal therapy

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Perova M.D., Samochvalova D.D., Khalafyan A.A., Akinshina V.A. Assessment of Relative Risk for Periodontitis Progression Using Neural Network Modeling: Cohort Retrospective Study. *Kuban Scientific Medical Bulletin*. 2022; 29(5): 44–62 (In Russ., English abstract). <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2022-29-5-44-62>

Received: 08.04.2022

Received after revision: 08.07.2022

Accepted: 17.08.2022

ВВЕДЕНИЕ

Для определения возможного прогрессирования болезни известны различные методы оценки остаточного риска с профилированием параметров как на уровне зубов (функционально ориентированные группы зубов, витальные зубы или пролеченные эндодонтически, вовлечение фуркационного пространства, наличие периапикальных процессов, степень утраты костной опоры, подвижность зубов, количество утраченных зубов), так и на уровне пациента (пол, возраст, статус курения, коморбидные состояния, уровень приверженности к лечению — интервалы между сессиями ППТ) [1–5]. Проведены исследования в поддержку того, в какой степени предопределенная частота сессий ППТ может обеспечить стабильное состояние тканей пародонта в отдаленные сроки; выявлены факторы, влияющие на временную дистанцию и манипуляционную наполненность сессий ППТ [6, 7]. Вместе с тем не устранены разногласия по поводу оптимальных подходов к ППТ из-за трудностей точной диагностики активности заболевания и возможностей прогнозировать разрушительный процесс в опорном аппарате зубов в отдаленные сроки наблюдений за пациентами. При этом важность контроля факторов риска, например путем удаления бактериального налета, над- и поддесневых зубных отложений, широко признана. Поэтому вмешательство сосредоточилось в основном на стратегиях улучшения индивидуального гигиенического ухода за деснами и зубами, контроле уровня мотивации и приверженности пациентов к лечению, устранения условий для микробных скоплений и управления рецидивирующими или сохраняющими свою активность очагами заболевания.

К настоящему моменту не определены диагностические параметры адекватности прогноза результатов лечения заболеваний пародонта [8]. В отечественных научных исследованиях мы не встретили расчетов относительного риска прогрессирования пародонтита или возникновения рецидивов после активного пародонтального лечения (АПЛ), что устанавливало бы взаимосвязи рисков факторов с оптимизацией подходов к ППТ в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Анализ иностранной литературы обнаружил неоднородность данных в отношении планирования ППТ, включая определенный набор количественных и качественных показателей на уровне зубов, зубного ряда и уровне пациента в оценках остаточного риска прогрессирования разрушительного процесса в пародонте после АПЛ [9–11].

Другой стороной выявленной проблемы в отношении трактовки результатов АПЛ с по-

мощью нестандартизированных подходов является поиск взаимосвязей между определенными клиническими и (или) иными параметрами с установлением их прогностической ценности для возможности стратификации риска прогрессирования или рецидива пародонтита. При этом не следует недооценивать тот факт, что при постановке задач исследователь всегда имеет определенную степень предвзятости, опираясь на ранее запрограммированные инструкции при оптимизации прогнозов. В этой связи представляется актуальным использование возможностей искусственного интеллекта, который поможет обеспечить процесс автоматизированного обнаружения закономерностей при взаимодействии разнородных данных с непрозрачным алгоритмом.

Цель исследования — определить относительный риск прогрессирования хронического генерализованного пародонтита или рецидива после активной пародонтальной терапии путем построения и анализа прогностических нейросетевых моделей.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Реализация поставленной цели была достигнута на основании данных продольного ретроспективного когортного исследования.

Условия проведения исследования

Отбор первичного материала для исследования проведен на базах государственного бюджетного учреждения здравоохранения «Краевая клиническая стоматологическая поликлиника» Министерства здравоохранения Краснодарского края, государственного бюджетного учреждения здравоохранения «Стоматологическая поликлиника № 3» Министерства здравоохранения Краснодарского края и «Стоматология» ООО «Каста» (г. Таганрог). Исследователи были предварительно обучены методике сбора информации: оценке дневниковых записей в медкартах пациентов, анализу данных рентгенограмм, изучению уровня комплаентности пациентов в ходе ППТ и сведению полученных данных в единую таблицу для статистической обработки. В ходе исследования была изучена деперсонализированная медицинская документация (медицинские карты амбулаторного пациента, рентгенограммы зубов и челюстно-лицевой области) в соответствии с протоколом исследования у прошедших базовое АПЛ в период с 1999 по 2016 год и находящихся на поддерживающей пародонтальной терапии в сроки 5 лет ≤ ППТ ≤ 20 лет.

Критерии соответствия**Критерии включения**

Взрослые пациенты обоего пола, возраст от 30 до 70 лет, независимо от статуса курения и наличия коморбидной патологии, после АПЛ разными известными методами по поводу хронического генерализованного пародонтита легкой, средней и тяжелой степени (K05.3 — классификация МКБ-10), зубопротезирование которым осуществлено съёмными и несъёмными конструкциями, включая применение дентальных имплантатов, и находившихся на поддерживающей терапии в течение $5 \text{ лет} \leq \text{ППТ} \leq 20 \text{ лет}$.

Критерии не включения

Агрессивный пародонтит. Пациенты, в медицинских картах которых отсутствует необходимая для анализа информация.

Критерии исключения

На протяжении исследования не было случаев исключения информации медкарт из анализа.

Описание критериев соответствия

Первичный материал в виде единой базы данных для исследования был структурирован на категориальные и количественные переменные (предикторы). Категориальные показатели включали пол, возрастную группу, наличие коморбидных состояний, статус курения, диагноз, вид АПЛ. Количественные переменные: данные объективного клинического состояния полости рта включали показатели, зафиксированные в медицинской документации, для проведения сравнительной оценки в отдаленные сроки исследования.

Подбор участников в группы

Предварительный анализ данных 236 медицинских карт пациентов хроническим генерализованным пародонтитом после проведенного базового АПЛ показал, что только 46,2% просмотренных медкарт — 109 пациентов — соответствуют критериям включения и могут быть использованы в итоговом анализе исследовательской когорты.

Целевые показатели исследования**Основной показатель исследования**

Основной конечной точкой исследования явилось определение уровня относительного риска прогрессирования пародонтита или рецидива патологического процесса в опорном аппарате зубов со стратификацией на низкий и высокий у пациентов в отдаленном периоде наблюдений.

Дополнительные показатели исследования

Целевыми для построения прогностических моделей были выбраны клинические показатели у пациентов, находящихся на ППТ в сроки от 5 до 20 лет. Это индекс налета (ИН**), число сохраненных в полости рта зубов (ЧСЗ**), число зубов, имеющих глубину поддесневого зондирования менее 4 мм (ГЗ_1 **), и процент зубов с симптомом кровоточивости десен ($\% \text{Кр}_{\text{зубы}}$ **).

Методы измерения целевых показателей

Каждому пациенту определен индекс налета, ИН (Green — Vermillion, OHI-S); число сохраненных зубов, ЧСЗ (расчет от 28 зубов, третьи моляры не учитывались); количество зубов с глубиной поддесневого зондирования менее 4 мм, ГЗ_1 (градуированный пародонтальный зонд использовали без давления на инструмент); процент зубов, имеющих симптом кровоточивости десен, $\% \text{Кр}_{\text{зубы}}$ (в группе моляров измерения проводили в 6 точках; в остальных группах зубов — в 4 точках; оценка появления крови через 30" после удаления зонда).

Исходы лечения стандартизированно оценивали в среднесрочной и долгосрочной перспективе — $5 \text{ лет} \leq \text{ППТ} \leq 20 \text{ лет}$ на момент зафиксированной в медкарте последней сессии ППТ.

Переменные (предикторы, конфаундеры, модификаторы эффекта)**Категориальные предикторные показатели**

Пол (муж., жен.); возрастные группы: 1) 30–54 года, 2) 55–70 лет; принадлежность к курению (да, нет); наличие общих соматических заболеваний, ОСЗ (да, нет); направленность АПЛ (консервативная терапия, резекционное хирургическое лечение и регенеративное хирургическое лечение); диагноз хронического генерализованного пародонтита в градациях — легкой, средней и тяжелой степени; степени стратификации риска на низкий и высокий.

Количественные предикторные показатели

Клинические показатели, используемые в структуре прогностических нейросетевых моделей: ИН — индекс налета; ЧСЗ — число сохраненных зубов; ГЗ_1 (<4 мм) — глубина поддесневого зондирования; ГЗ_2 (4–6 мм); ГЗ_3 (>6 мм); $\% \text{Кр}_{\text{зубы}}$ — процент зубов, имеющих симптом кровоточивости десен; i — количество дентальных имплантатов в полости рта; $\text{ГЗ}i_1$ — количество дентальных имплантатов с глубиной зондирования околоимплантатной десневой манжетки

< 3 мм; GZi_2 — количество дентальных имплантатов с глубиной зондирования околоимплантатной десневой манжетки > 3 мм; Kri — число дентальных имплантатов, имеющих кровоточивость околоимплантатной десневой манжетки.

Статистические процедуры

Принципы расчета размера выборки

Размер выборки предварительно не рассчитывали.

Статистические методы

Статистическая обработка полученных данных проведена посредством статистического пакета Statistica 13.3 (Tibco, USA): для количественных показателей вычислены центральная тенденция (медиана), вариационные статистики (квартили, стандартное отклонение), статистики диапазона (минимальное, максимальное значения). Поскольку анализ количественных показателей установил несоответствие их распределения нормальному закону, для их сравнения были применены непараметрические критерии. Сравнение средних значений показателей в различные периоды наблюдений проводили с помощью критерия Вилкоксона и критерия знаков; для оценки наличия и силы взаимосвязей между предикторными и целевыми показателями использовали коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Во всех случаях статистического анализа принят уровень статистической значимости $p = 0,05$.

В качестве инструментария построения нейросетевых моделей использовали автоматизированные нейронные сети DATAMINING программы STATISTICA¹ (Tibco, USA) [12]. Согласно алгоритму построения прогностических нейросетевых моделей датчиком случайных чисел сформированную когорту делили на обучающую, контрольную и тестовую выборки. Для оценки качества нейросетей по их способности к прогнозированию количественных целевых показателей использовали производительность сети как значение коэффициента корреляции между исходными и прогнозными значениями показателей, дополнительно определяли средний абсолютный остаток как среднюю абсолютную разницу между целевыми показателями и значениями, предсказанными сетью. Для оценки качества нейросетей по их способности к прогнозированию категориального целевого показателя — степени риска прогрессирования пародонтита и (или) появления рецидива патологического процесса применили производительность сети как долю

правильно классифицированных сетью случаев высокого и низкого риска.

Ключевой метрикой оценки предиктивной силы итоговой модели для решения задачи классификации остаточного риска является ROC AUC анализ. Метрика AUC — это площадь покрытия пространства под ROC-кривой, представляющей график взаимодействия двух параметров: истинно положительных и ложноположительных результатов классификации. Задача бинарной классификации решается максимизированием этой метрики. Предсказательную силу модели также оценивали при помощи показателей чувствительности и специфичности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Формирование выборки исследования

Формирование когорты, представленное на рисунке 1, проведено согласно критериям включения и исключения в ретроспективное когортное исследование, медицинских карт пациентов хроническим генерализованным пародонтитом после базового (активного) лечения и находившихся на поддерживающей пародонтальной терапии 5 лет $\leq$ ППТ $\leq$ 20 лет.

Характеристики выборки (групп) исследования

Когорта для исследования включала медицинскую документацию 109 пациентов, результаты лечения которых были оценены в возрастных группах: 30–54 года — 66 чел. (60,5%) и 55–70 лет — 43 чел. (39,5%); лечение пациентов хроническим генерализованным пародонтитом было проведено 26 чел. (23,8%) с легкой степенью процесса, 52 чел. (48%) — со средней степенью и 31 чел. (28,2%) — с тяжелой степенью; у 56 мужчин (51,4%) и 53 женщин (48,6%); наличием ОСЗ (коморбидных состояний) — 45 чел. (41,3%) и у длительно и много курящих — 17 чел. (15,6%). Все пациенты получили базовое активное пародонтальное лечение: 39 пациентам (35,8%) проведено только консервативное (терапевтическое) лечение, 13 пациентам (11,9%) — консервативное лечение, дополненное лоскутной (резекционной) хирургией тканей пародонта, 57 пациентам (52,3%) проведено хирургическое лечение с регенеративной направленностью.

Основные результаты исследования

Описательные статистики динамики количественных показателей, отражающих состояние тканей пародонта в когорте при первичном

¹ Халафян А.А. Методы машинного обучения в DataMining пакета STATISTICA: учебное пособие для вузов. М: Научно-техническое издательство «Горячая линия — Телеком», 2022. 260 с.



Рис. 1. Дизайн ретроспективного когортного продольного исследования.

Примечание: МК — медицинская карта амбулаторного пациента; АПЛ — активное пародонтальное лечение; ППТ — поддерживающая пародонтальная терапия.

Fig. 1. Design of retrospective cohort longitudinal study.

Note: МК — Outpatient Medical Record (OMR); АПЛ — Active Periodontal Treatment (APT); ППТ — Supportive Periodontal Therapy (SPT)

обращении, через 4–6 месяцев после базового АПЛ и в отдаленном периоде — 5 лет $\leq$ ППТ $\leq$ 20 лет, сведены в таблицы 1 и 2. Основные изменения в опорном аппарате зубов в сроки наблюдений обсуждены в следующем разделе.

До построения прогностических нейросетевых моделей предварительно исследовали наличие и силу взаимосвязи целевых показателей с категориальными и количественными предикторами. Как видно из таблицы 3, целевой показатель ЧСЗ** имеет статистически значимую сильную корреляционную связь с количеством оставшихся в полости рта зубов, в области которых произошло существенное уменьшение пародонтальных карманов после базового активного лечения. Обратная корреляционная зависимость умеренной силы выявлена между ЧСЗ** и остаточными пародонтальными карманами, что отражают показатели ГЗ₂ и ГЗ₃. Активность воспалительно-деструктивного процесса в пародонте (%Кр_{зубы}**) оказалась умеренно зависимой от возраста и наличия у пациентов коморбидных состояний. Неожиданным было отсутствие статистически значимой связи целевых и предикторных переменных с курением и полом.

Таким образом, выявление взаимосвязей клинических переменных, иногда неявных, но с возможным влиянием на прогрессирование патологического процесса в пародонте, обусловило перспективность построения прогностических моделей с помощью искусственных нейронных сетей, поскольку наличие указанных взаимосвязей не ставит знака равенства с прогностической ценностью.

Датчиком случайных чисел когорты была разделена на обучающую выборку — 77 пациентов, контрольную и тестовую выборку по 16 пациентов. Обучающая выборка использовалась для обучения сети, контрольная — для проверки ее производительности во время обучения, тестовая — для выполнения финальных проверочных тестов, чтобы определить, насколько хорошо сеть прогнозирует «новые» данные, которые не использовались ни для обучения модели, ни для проверки ее производительности при обучении. Из 1000 автоматически построенных и обученных нейронных сетей — двухслойных персептронов для целевых показателей ИН**, ЧСЗ**, ГЗ₁** были выбраны одноступенчатые сети MLP 24-5-1 с наилучшими прогностическими свойствами, определяемыми их производи-

Таблица 1. Описательные статистики показателей до и после АПЛ
Table 1. Comparison of average values of indicators before and after APT

Предикторные переменные	Среднее значение	Медиана	Минимальное значение	Максимальное значение	Нижняя квартиль	Верхняя квартиль	Среднее квадратическое отклонение	p-уровень	
								по критерию знаков	по Вилкоксоу
ИН	1,968	1,940	0,340	2,850	1,720	2,350	0,524	0,000	0,000
ИН*	0,723	0,520	0,230	2,360	0,410	0,980	0,511		
ЧСЗ	26,248	24,000	20,000	27,000	23,000	26,000	2,396	0,000	0,000
ЧСЗ*	22,128	24,000	19,000	27,000	22,500	26,000	2,805		
ГЗ ₁	16,398	19,000	16,000	27,000	10,000	23,000	7,417	0,004	0,003
ГЗ ₁ *	18,750	21,000	0,000	23,000	15,000	24,000	7,331		
ГЗ ₂	5,370	4,000	0,000	19,000	3,000	6,500	4,240	0,000	0,000
ГЗ ₂ *	2,639	2,000	0,000	13,000	0,000	5,000	2,969		
ГЗ ₃	2,491	1,000	0,000	8,000	0,000	5,500	2,719	0,000	0,000
ГЗ ₃ *	1,056	0,000	0,000	7,000	0,000	2,000	1,707		
%Кр _{зубы}	27,752	24,145	7,640	54,630	21,050	34,730	10,574	0,000	0,000
%Кр _{зубы} *	11,264	8,195	4,220	48,050	7,070	11,810	8,515		
i	0,593	0,000	0,000	6,000	0,000	1,000	1,168	0,000	0,000
i*	2,380	2,000	0,000	7,000	0,000	4,000	2,258		
ГЗi ₁	0,296	0,000	0,000	6,000	0,000	0,000	0,899	0,000	0,000
ГЗi ₁ *	2,287	2,000	0,000	6,000	0,000	4,000	2,179		
ГЗi ₂	0,278	0,000	0,000	3,000	0,000	0,000	0,695	0,153	0,026
ГЗi ₂ *	0,111	0,000	0,000	3,000	0,000	0,000	0,418		
Крi	0,259	0,000	0,000	2,000	0,000	0,000	0,617	0,006	0,001
Крi*	0,037	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,190		

Примечание: значения показателей, помеченные звездочкой, соответствуют клиническому состоянию после проведенной активной пародонтальной терапии в сроки от 4 до 6 месяцев.

Note: the values of the indicators marked with an asterisk correspond to the clinical condition after active periodontal therapy, in the interval from 4 months to 6 months.

Таблица 2. Описательные статистики показателей после АПЛ и в отдаленные сроки
Table 2. Comparison of average values of indicators after APT and in the SPT period

Предикторные переменные	Среднее значение	Медиана	Минимальное значение	Максимальное значение	Нижняя квартиль	Верхняя квартиль	Среднее квадратическое отклонение	p-уровень	
								по критерию знаков	по Вилкоксоу
ИН*	0,723	0,520	0,230	2,360	0,410	0,980	0,511	0,002	0,030
ИН**	0,805	0,511	0,250	1,604	0,410	0,960	0,409		
ЧСЗ*	24,128	24,000	20,000	26,000	22,500	26,000	2,805	0,006	0,011
ЧСЗ**	21,596	23,000	18,000	25,000	20,000	24,000	3,266		
ГЗ 1*	18,750	21,000	16,000	27,000	15,000	24,000	7,331	0,000	0,000
ГЗ1**	18,743	21,000	16,000	27,000	15,000	24,000	7,297		
ГЗ 2*	2,639	2,000	0,000	13,000	0,000	5,000	2,969	0,396	0,372
ГЗ 2**	2,661	2,000	0,000	13,000	0,000	5,000	2,963		
ГЗ 3*	1,056	0,000	0,000	7,000	0,000	2,000	1,707	0,009	0,003
ГЗ 3**	1,046	0,000	0,000	7,000	0,000	2,000	1,702		
%Кр _{зубы} *	11,264	8,195	4,220	48,050	7,070	11,810	8,515	0,000	0,000
%Кр _{зубы} **	11,311	8,230	4,220	48,050	7,110	11,810	8,489		
i*	2,380	2,000	0,000	7,000	0,000	4,000	2,258	0,002	0,005
i**	2,358	2,000	0,000	7,000	0,000	4,000	2,259		

Продолжение табл. 2
Table 2 continuation

Предикторные переменные	Среднее значение	Медиана	Минимальное значение	Максимальное значение	Нижняя квартиль	Верхняя квартиль	Среднее квадратическое отклонение	p-уровень	
								по критерию знаков	по Вилкок-сону
ГЗi 1*	2,287	2,000	0,000	6,000	0,000	4,000	2,179	0,014	0,026
ГЗi 1**	2,266	2,000	0,000	6,000	0,000	4,000	2,180		
ГЗi 2*	0,111	0,000	0,000	3,000	0,000	0,000	0,418	0,149	0,077
ГЗi 2**	0,110	0,000	0,000	3,000	0,000	0,000	0,416		
Крi*	0,037	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,190	1,000	0,767
Крi**	0,044	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,189		

Примечание: * — клинические показатели после АПЛ; ** — клинические показатели в сроки 5 лет $\leq$ ППТ $\leq$ 20 лет. Уровни значимости p округлены до 3-го знака после запятой. Различия значимы при $p < 0,05$.

Note: * — after APT; ** — clinical indicators within 5 years $\leq$ SPT $\leq$ 20 years. The significance levels of p are round to the nearest three decimal places. The differences are significant at $p < 0.05$.

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа взаимосвязи категориальных значений, целевых и предикторных переменных

Table 3. Results of correlation analysis of the interrelation between categorical values, target and predictor variables

Предикторные переменные	Ранговые корреляции Спирмена (r)				
	Целевые показатели				
	ИН**	ЧСЗ**	ГЗ _i **	% Кр (зубы)**	Риск
Пол	-0,062	0,152	0,092	-0,112	-0,004
Возрастная группа	0,065	-0,433	-0,402	0,127	0,410
Курение	-0,072	-0,028	-0,025	-0,029	0,050
ОСЗ	-0,226	0,440	0,421	-0,189	-0,363
АПЛ	-0,371	0,075	0,302	-0,492	-0,425
Диагноз	0,185	-0,697	-0,621	0,187	0,461
ИН	0,434	-0,367	-0,490	0,416	0,411
ЧСЗ	-0,243	0,880	0,709	-0,269	-0,388
ГЗ ₁	-0,331	0,877	0,816	-0,362	-0,524
ГЗ ₂	0,292	-0,561	-0,642	0,384	0,520
ГЗ ₃	0,346	-0,654	-0,591	0,179	0,345
% Кр (зубы)	0,306	-0,313	-0,437	0,531	0,413
i	-0,322	-0,028	0,150	-0,188	-0,198
ГЗ _{i1}	-0,333	-0,018	0,164	-0,193	-0,243
ГЗ _{i2}	-0,001	-0,013	-0,022	-0,026	0,236
Кр _i	-0,068	0,115	0,123	-0,030	0,144

Примечание: 1. Отмеченные жирным коэффициенты корреляции значимы на уровне $p < 0,05$. 2. Если коэффициент корреляции вычислен для количественных показателей, то знак (+) означает, что увеличение одного показателя ведет к увеличению другого, знак (-) означает, что увеличение одного показателя ведет к уменьшению другого. Если один из показателей (или оба) категориальный, то знаки не следует интерпретировать.

Note: 1. Bolded correlation coefficients are significant at $p < 0.05$. 2. If the correlation coefficient is calculated for quantitative indicators, then the sign (+) means that an increase in one indicator leads to an increase in the other one, the sign (-) means that an increase in one indicator leads to a decrease in the other one. If one of the indicators (or both) is categorical, the signs should not be interpreted.

тельностью: коэффициентом корреляции (r) исходных значений показателя с предсказанными сетью значениями на обучающей, контрольной и тестовой выборках. Первое число в обозначении сети указывает на количество входных нейронов, которое определяется суммой количества непрерывных показателей — 10 и суммарным

количеством значений, которые принимают категориальные показатели: пол (2), возрастная группа (2), курение (2), ОСЗ (2), АПЛ (3), диагноз (3) — 14, в сумме получаем $10 + 14 = 24$. Второе и третье — число скрытых и выходных нейронов в модели, которое соответствует количеству прогнозируемых значений количественного показателя.

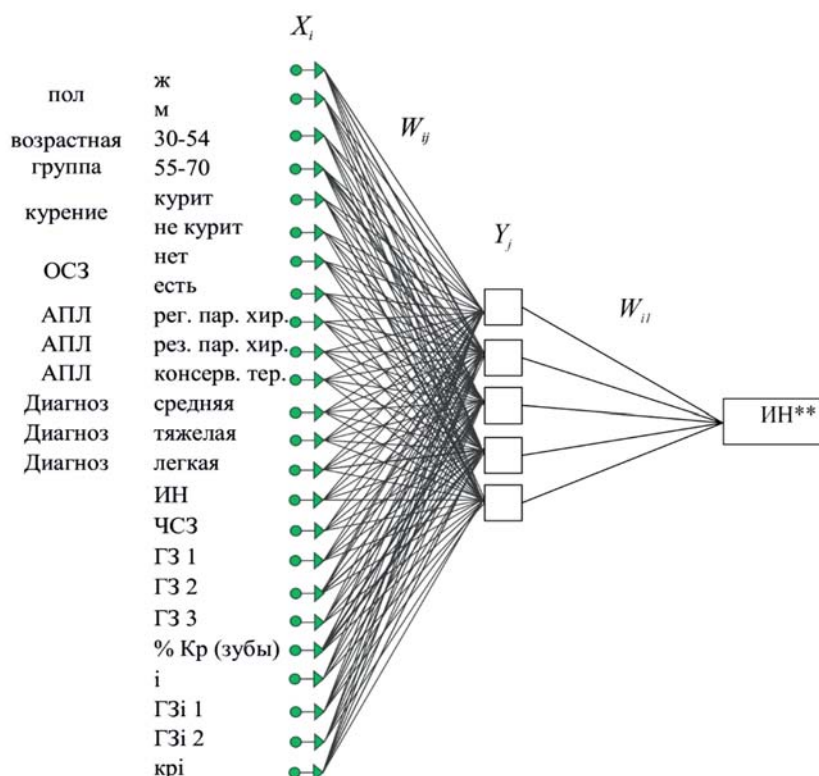


Рис. 2. Архитектура нейронной сети для MLP 24-5-1.

Примечание: ¹ Нейронная сеть MLP 24-5-1 содержит 3 слоя: промежуточный слой Y_j содержит 5 скрытых нейронов; первый слой X_i состоит из 24 нейронов, соответствующих входным количественным показателям и категориальным значениям, третий слой включает 1 нейрон, прогнозирующий значение $ИН^{**}$. ² Первое число в обозначении сети указывает на число входных нейронов, которое определяется суммой предикторных показателей — 10 и количеством значений, которые принимают категориальные показатели: пол (2), возрастная группа (2), курение (2), коморбидные состояния, ОСЗ (2), АПЛ (3), диагноз (3) — 14: получается $10 + 14 = 24$. Второе и третье число — количество скрытых и выходных нейронов, соответствующее количеству прогнозируемых значений предикторов, в данном случае для $ИН^{**}$.

Fig. 2. Neural Network Architecture for MLP 24-5-1.

Notes: ¹ The MLP neural network 24-5-1 contains 3 layers: the intermediate layer Y_j contains 5 hidden neurons; the first layer X_i consists of 24 neurons corresponding to the input quantitative indicators and categorical values, the third layer includes 1 neuron predicting the value $ИН^{**}$. ² The first number in the network designation indicates the number of input neurons, which is determined by the sum of predicted indicators — 10 and the number of values that categorical indicators take: gender (2), age group (2), smoking (2), comorbid conditions, general somatic diseases, ОСЗ (2), Active Periodontal Treatment, АПЛ (3), diagnosis (3) — 14: therefore, $10 + 14 = 24$. The second and third number is the number of hidden and output neurons corresponding to the number of prognostic predictor values, in this case for $ИН^{**}$.

теля для каждого больного — 1. Для прогнозирования $\%Кр_{зубы}^{**}$ выбрана сеть MLP 24-14-1.

На рисунке 2 изображена архитектура нейросети MLP 24-5-1 для целевого показателя $ИН^{**}$. Соответствия между предсказанными сетью и исходными значениями целевой переменной $ИН^{**}$ наглядно представлены на диаграммах рассеяния для каждой выборки (рис. 3). Координаты точек (значения показателей) по горизонтальной и вертикальной осям соответствуют исходному и предсказанному значениям целевой переменной. Чем выше корреляционная связь, тем ближе точки расположены к линии регрессии.

На графиках видно, что точки, соответствующие исходным и прогнозным значениям $ИН^{**}$, расположены наиболее плотно к линии регрессии в обучающей выборке ($r = 0,986$), несколько дальше расположены точки для контрольной выборки ($r = 0,794$) и чуть плотнее для тестовой выборки ($r = 0,872$). Аналогичным образом ведут себя средние значения абсолютных разностей исходных и прогнозных значений (AbRes), которые для обучающей, контрольной и тестовой выборок приняли соответственно значения 0,121; 0,438; 0,283. Показатели адекватности построенных прогностических моделей для количественных

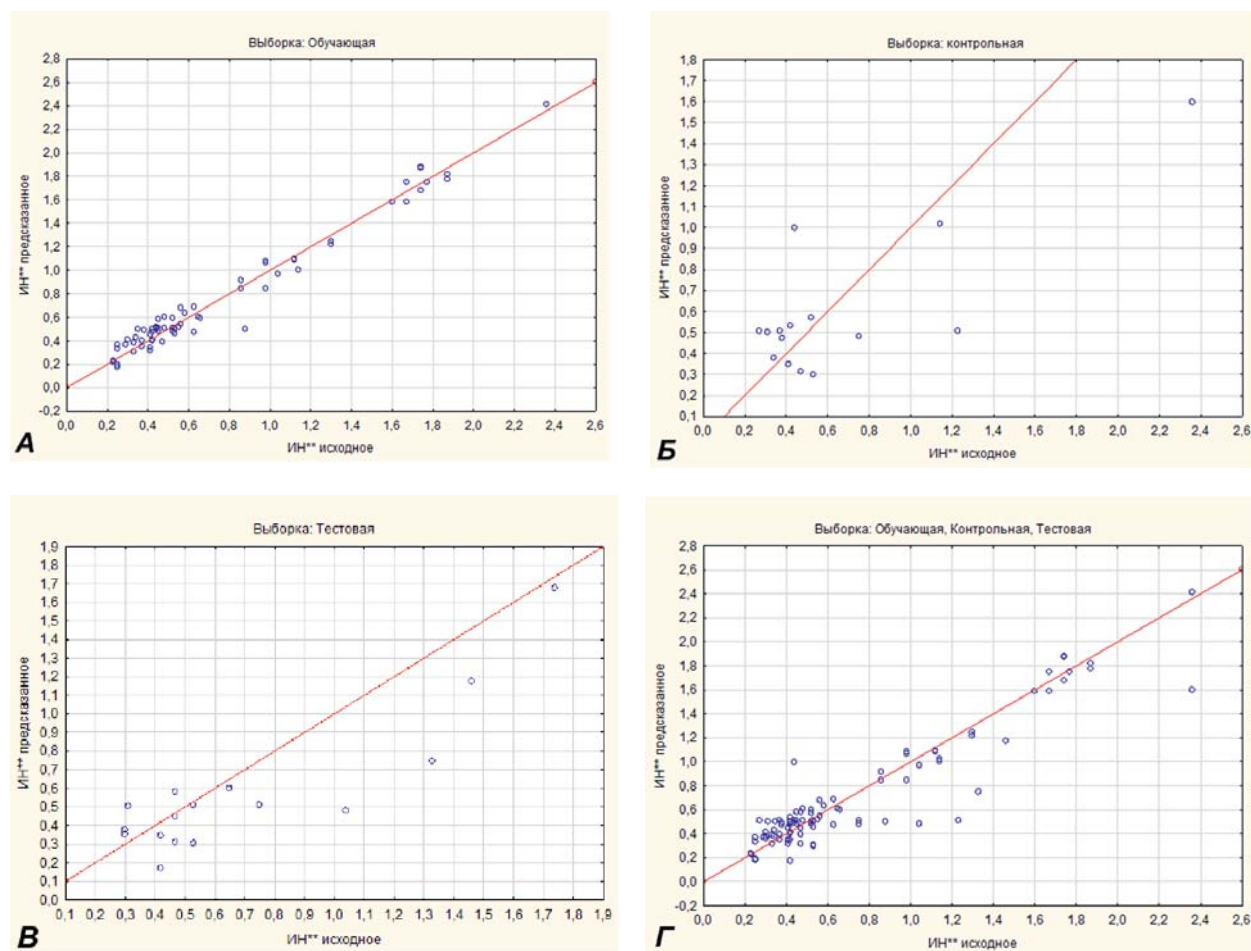


Рис. 3. А–Г: диаграммы рассеяния исходных и предсказанных значений ИН** для обучающей, контрольной и тестовой выборки и в когорте.

Fig. 3. A–Г: Scatter graphs of initial and predicted ИН** values for training, control and test samples and in cohort.

Таблица 4. Сравнительные параметры построенных нейронных сетей для целевых показателей
Table 4. Comparison of built neural networks for target indicators

Топология нейросетей	Обучающая выборка		Контрольная выборка		Тестовая выборка		Алгоритм обучения	Функция ошибки (сумма квадратов)	Функция активации нейронов скрытого слоя	Функция активации выходного слоя
	производительность	AbRes	производительность	AbRes	производительность	AbRes				
MLP 24-5-1 для ИН**	0,986	0,121	0,794	0,438	0,872	0,283	BFGS 45	SOS	Tanh	Identity
MLP 24-5-1 для ЧЗ3**	0,993	0,009	0,976	0,013	0,964	0,027	BFGS 44	SOS	Exponential	Tanh
MLP 24-5-1 для ГЗ ₁ **	0,925	0,155	0,858	0,09	0,976	0,072	BFGS 13	SOS	Tanh	Tanh
MLP 24-14-1 для %Кр _{зубы} **	0,935	0,207	0,885	0,295	0,94	0,288	BFGS 13	SOS	Tanh	Logistic

целевых показателей и параметры сетей отображены в таблице 4.

Сравнительная оценка значений критериев адекватности построенных нейросетей позволила распределить сети по убыванию их предска-

тельных способностей в следующей последовательности: I. MLP 24-5-1 прогнозирование ЧЗ3**; II. MLP 24-5-1 прогнозирование ГЗ₁**^{***}; III. MLP 24-14-1 прогнозирование %Кр_{зубы}**^{***}; IV. MLP 24-5-1 прогнозирование ИН**.

Таблица 5. Параметры нейронной сети для прогнозирования степени риска прогрессирования пародонтита

Table 5. Neural network parameters for predicting the risk of periodontitis progression

Топология	Обучающая произв.	Контрольная произв.	Тестовая произв.	Алгоритм обучения	Функция ошибки	Функция активации нейронов скрытого слоя	Функция активации выходного слоя
MLP 24-11-2	87,013	75,000	93,75	BFGS 6	SOS	Logistic	Tanh

Из 1000 автоматически построенных и обученных нейронных сетей — двухслойных персептронов для категориального целевого показателя риска прогрессирования пародонтита была выбрана сеть MLP 24-11-2 (табл. 5) с наилучшими прогностическими свойствами, определяемыми их производительностями — долями правильно классифицированных больных по группам риска (низкий, высокий). Доли правильной классификации пациентов в обучающей, контрольной и тестовой выборке достигли соответственно 87,013; 75,000 и 93,750%.

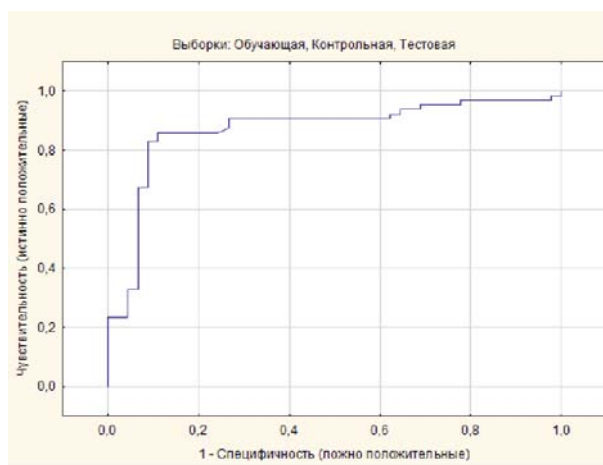
Таблица 6 демонстрирует распределение долей правильной и неправильной классификации пациентов по группам риска — высокий, низкий, в трех выборках. В обучающей выборке из 50 пациентов группы высокого риска 45 (90%) правильно отнесены сетью к данной группе, 5 (10%) ошибочно отнесены к группе низкого риска. Из 27 пациентов группы низкого риска 22 (81,481%) правильно отнесены к данной группе; 5 (18,519%) ошибочно отнесены к группе высокого риска. Общая точность классификации (производительность сети) на обучающей выборке составила 87,013%.

Так как определенный практический интерес представляет прогнозирование принадлежности пациентов к группе высокого риска, то правильную идентификацию больного высокого риска можно считать истинно положительной классификацией, а ошибочную идентификацию пациента низкого риска — считать ложноположительной классификацией. Такое предположение позволяет применить анализ чувствительности и специфичности разработанных нейросетевых моделей. По таблице 6 легко определить, что чувствительность разработанной нейросетевой модели прогнозирования риска на обучающей, контрольной и тестовой выборках равна соответственно 90, 67, 80%. Специфичность модели на обучающей, контрольной и тестовой выборках равна соответственно 81,481, 85,714, 100%. Для всей когорты больных чувствительность и специфичность составили 85,937 и 86,666%.

Таблица 6. Результаты прогнозирования степени риска прогрессирования пародонтита на обучающей, контрольной и тестовой выборках

Table 6. Results of prediction of risk for periodontitis progression for training, control and test samples

Обучающая выборка			
	Высокий	Низкий	Все
Все	50	27	77
Правильно	45	22	67
Неправильно	5	5	10
Правильно (%)	90	81,481	87,013
Неправильно (%)	10	18,519	12,987
Контрольная выборка			
	Высокий	Низкий	Все
Все	9	7	16
Правильно	6	6	12
Неправильно	3	1	4
Правильно (%)	66,666	85,714	75
Неправильно (%)	33,334	14,286	25
Тестовая выборка			
	Высокий	Низкий	Все
Все	5	11	16
Правильно	4	11	15
Неправильно	1	0	1
Правильно (%)	80	100	93,75
Неправильно (%)	20	0	6,25

Рис. 4. Кривая ROC анализа для всех выборок.
Fig. 4. ROC curve for all samples.

На рисунке 4 приведена кривая ROC AUC анализа зависимости чувствительности и специфичности модели для рабочей когорты. Площадь под кривой служит дополнительным критерием качества модели, максимальное значение которой, равное 1, достигается при равенстве чувствительности и специфичности модели 100%. Площадь под кривой равна 0,859.

Дополнительные результаты исследования

По разработанным моделям на языке C# (си шарп) написана программа для определения степени риска прогрессирования воспалительно-деструктивного процесса в опорном аппарате зубов для выбора врачом оптимального подхода к поддерживающему пародонтальному лечению в отдаленном периоде наблюдений (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022661003, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ — 14 июля 2022 года).

На примере пациента из исследуемой когорты показана возможность реализации программы в клинической практике в виде калькулятора расчета рисков (рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

В настоящем исследовании определена взаимосвязь клинических предикторных переменных,

категориальных значений с исходными целевыми показателями у пациентов с хроническим генерализованным пародонтитом для построения прогностических нейросетевых моделей относительного риска прогрессирования или рецидива патологического процесса в опорном аппарате зубов у пациентов, находящихся на ППТ. Принципиальная возможность определения степени риска с учетом идентифицированных детерминант позволит индивидуализировать лечение пациентов с пародонтитом и адекватно планировать манипуляционную наполненность сессий ППТ.

Ограничения исследования

Мы столкнулись с очевидными трудностями формирования ретроспективной когорты из-за обилия разнородных данных дневниковых записей врачей (отсутствие четких критериев выбора лечения пародонтита, адекватности и полноты проведения лечебных мероприятий, а также оценки полученных результатов). Поскольку ведением пациентов с проблемами опорного аппарата зубов в отсутствие врачебной специальности «врач-пародонтолог» занимаются врачи разных специализаций (стоматологи-терапевты, хирургии, стоматологи общей практики, а также средний медперсонал — гигиенисты стоматологические), не исключено влияние на обобщаемость разработанной прогностической модели.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОГРЕССИРОВАНИЯ ПАРОДОНТИТА В ПЕРИОДЕ ПОДДЕРЖИВАЮЩЕГО ЛЕЧЕНИЯ МЕТОДОМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Пол	женский	Индекс налета	0,4	Процент кровоточивости десны вокруг зубов	11,18
Возрастная группа	30-54	Число сохраненных зубов	25	Число зубных имплантатов	2
Курение	курит	Глубина поддесневое зондирования вокруг зубов:		Глубина зондирования десны вокруг имплантата:	
ОСЗ	нет	ГЗ1 – глубина зондирования = < 4 мм	20	ГЗi1 – глубина зондирования = < 3 мм	2
АПЛ	рег. пар. хир.	ГЗ2 – глубина зондирования = 4-6 мм	4	ГЗi2 – глубина зондирования = ≥ 3 мм	0
Диагноз	средняя	ГЗ3 – глубина зондирования = > 6 мм	4	Число имплантатов с кровоточивостью десны, окружающей имплантат	0

Индекс налета (отдаленный результат ≥5 лет) = 0,41
 Число сохраненных зубов (отдаленный результат ≥5 лет) = 22,99
 ГЗ1 – глубина зондирования = < 4 мм (отдаленный результат ≥5 лет) = 23,71
 Процент кровоточивости десны вокруг зубов (отдаленный результат ≥5 лет) = 5,38
 Уровень риска - Низкий

Рассчитать **Сброс** **Выход**

Рис. 5. Пример реализации программы для прогнозирования остаточного риска прогрессирования пародонтита.

Fig. 5. Sample program realization for prediction of residual risk for periodontitis progression.

Интерпретация результатов исследования

Выбор ретроспективного дизайна исследования обусловлен известной со времен Гипократа данностью, что «построение прогнозов требует знаний прошлого и настоящего». Особо сложным для практикующего врача представляется выявление клинических предикторов и связанных с ними воздействий между несколькими потенциальными факторами риска прогрессирования или рецидива патологического процесса в пародонте в периоде поддерживающей терапии [10, 11]. В работе осуществлена попытка создать прототип оценки остаточного риска, обусловленного отбором клинических количественных переменных, дискретизацией категориальных (качественных) показателей и поведенческих воздействий, а также примененных методов активного пародонтального лечения с целью предотвращения проблем с опорным аппаратом зубов в отдаленные сроки наблюдений — 5 лет $\leq$ ППТ $\leq$ 20 лет.

Важным исходом АПЛ явилось увеличение среднего числа зубов, имеющих глубину зондирования менее 4 мм (G_{3_1}) — с 16,398 зуба $\pm$ 7,417 мм ($m \pm SD$) до 18,750 зуба $\pm$ 7,331 мм ($m \pm SD$) при $p = 0,004$ (по критерию знаков), что указывает на уменьшение глубины пародонтальных карманов за счет формирования структур нового прикрепления и частичной ретракции десневого края (табл. 1 и 2). Отмечено повышение качества ухода за деснами и зубами сразу после АПЛ, однако в отдаленные сроки индекс налета в когортке демонстрировал тенденцию к росту, составив $0,805 \pm 0,409$ балла ($m \pm SD$) с $0,723 \pm 0,511$ балла ($m \pm SD$) при $p = 0,002$. Закономерным эффектом АПЛ явилось редуцирование активности воспаления десны, выраженное снижением процента зубов, имеющих кровоточивость десны при зондировании: с 27,752% (диапазон разброса: min. 7,640%, max. 54,630%) до 11,311% (диапазон разброса: min. 4,220%, max. 48,050%) в отдаленном периоде наблюдений.

В рамках данного исследования была возможность проследить исходы в подгруппах АПЛ пародонтита средней и тяжелой степени после направленной регенерации тканей с разработанной нами совместно с НПО «Экофлон», СПб, отечественной нерезорбируемой ПТФЭ мембраной (20 лет наблюдений). ЧСЗ снизилось в среднем с 24 зубов (диапазон разброса: min. 20 зуб., max. 26 зуб.) до 21 зуба, причем не по причинам, связанным с пародонтитом (диапазон разброса: min. 18 зуб., max. 25 зуб.), в то время как в целом по когортке ЧСЗ** сократилось в среднем с 26 зубов (диапазон разброса: min. 20 зуб., max. 27 зуб.) при $p = 0,000$ до 21 зуба (диапазон разброса:

min. 18 зуб., max. 25 зуб.) при $p = 0,006$. Стойкое во времени реконструированное зубодесневое прикрепление обусловило среднее увеличение числа зубов с частично устраненными пародонтальными карманами (динамика показателя G_{3_1}) с 0,1 до 5,3 зуба в сравнении с данными когорты — с 0,3 до 2,3 зуба, тогда как в подгруппах пациентов с консервативным лечением и простой лоскутной хирургией только в 30% случаев наблюдались рецидивы патологического процесса в пародонте в те же сроки. Полученные данные согласуются с общими положениями концепции современной пародонтологии в отношении зависимости периориска от направленности АПЛ [6, 12, 13]. Р. Cortellini *et al.* (2017) также констатировал отсутствие утраты зубов по причинам разрушения пародонта в течение 20 лет наблюдений у пациентов после регенеративных операций [14].

Включением в статистический анализ фактора целостности зубного ряда отмечена взаимосвязь состояния пародонта с присутствием остеоинтегрированных дентальных имплантатов. Так, количество искусственных опор после лечения в когортке возросло с $0,593 \pm 1,168$ импл. ($m \pm SD$) до $2,358 \pm 2,259$ импл. ($M \pm SD$) при $p = 0,002$ притом, что оценка здорового состояния околоимплантатной десневой манжетки, определяемая показателем глубины зондирования менее 3 мм (G_{3_1}), демонстрировала высокий уровень функциональности дентальных имплантатов в периоде ППТ: $2,266 \pm 2,180$ мм ($m \pm SD$), при $p = 0,014$ (по критерию знаков), при статистически незначимых различиях в оценке кровоточивости (при $p = 1,000$) и снижении сопротивления зондированию в десне, окружающей искусственные опоры — G_{3_2} (при $p = 0,149$). После регенеративного лечения с восстановлением целостности зубных рядов дентальными имплантатами были отмечены положительные эффекты взаимовлияния: в отдаленные сроки число искусственных опорных единиц в среднем на одного пациента составило 5,4 импл. при нормальной глубине зондирования околоимплантатной манжетки (≤ 3 мм) — 5,2 импл., что отражает приемлемую эффективность лечения и полноценность протокола поддерживающей терапии в сроки до 20 лет. Зубы после регенеративного лечения, но в дальнейшем использованные в качестве опорных единиц несъемных и частично съемных зубных протезов, оказались утраченными в долгосрочной перспективе, что отразилось на значении временных переменных по когортке в целом. Таким образом, появление, но не широкое использование передовых методов лечения болезней пародонта не оправдывает неоптимальный выбор в виде удаления зубов, подходящих

для лечения, и хорошо вознаграждается сохранением естественного зубного ряда или замещением дефектов зубного ряда дентальными имплантатами с взаимосохраниющимися эффектами.

Лучшее понимание известных закономерностей разрушительного процесса в опорном аппарате зубов, факторов риска и поведенческих факторов несколько сместило фокус, приводя к пониманию, что в совокупности сумма рисков, обусловленных сочетанием отдельных факторов, обеспечивает лучшую прогностическую способность, чем при использовании любого отдельного фактора [15, 16]. Поскольку многие факторы потенциально влияют на индивидуальную вариабельность риска развития пародонтита у пациента, в этом исследовании рассматривался спектр прогностических факторов, включая целевые показатели, отражающие исходное состояние тканей пародонта. В ходе исследования были проанализированы временные переменные предикторы и категориальные значения для выявления тех показателей, у которых имеется наибольший потенциал внедрения в клиническую практику для оказания помощи практическим врачам в принятии эффективных и основанных на знаниях решений.

В работе в качестве инструментария построения прогностических моделей использованы автоматизированные нейронные сети методов DataMining.

Приведенные результаты анализа производительности, чувствительности и специфичности моделей позволяют утверждать, что разработаны в достаточной степени адекватные нейросетевые модели для прогнозирования индекса налета (ИН**), числа сохранившихся в полости рта зубов (ЧСЗ**), количества зубов, имеющих глубину поддесневого зондирования менее 4 мм (GZ_1^{**}), процента зубов, имеющих симптом кровоточивости десен ($\% Kp_{зубы}^{**}$), степени риска прогрессирования пародонтита или развития рецидива патологического процесса, что в итоге позволит персонализировать лечение пациентов на этапе поддерживающей пародонтальной терапии, сделать его более направленным, а значит максимально эффективным. Преимущества использованного метода построения прогностических моделей с помощью искусственных нейронных сетей перед классическими методами — дискриминантным анализом, логистической и множественной регрессией в том, что они позволяют решать задачи классифи-

кации и регрессии с категориальными и количественными предикторными переменными для данных произвольной природы большого и малого объема.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование основано на новаторском подходе, в котором алгоритм машинного обучения посредством искусственных нейронных сетей применен в контексте построения прогностических моделей с оценкой чувствительности и специфичности для стратификации риска прогрессирования или возникновения рецидива пародонтита у пациентов, получивших базовое (активное) пародонтальное лечение и находящихся на длительной поддерживающей терапии. Продемонстрирована трансляционная ценность такого подхода и его потенциальная применимость в практической пародонтологии как инструмента поддержки принятия клинических решений. Практическая реализация результатов исследования нашла отражение в написании программы для калькулятора относительного риска.

СООТВЕТСТВИЕ ПРИНЦИПАМ ЭТИКИ

Проведенное исследование соответствует стандартам Хельсинкской декларации, одобрено независимым этическим комитетом федерального государственного бюджетного образования учреждения высшего образования «Кубанский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ул. им. Митрофана Седина, д. 4, г. Краснодар), протокол № 106 от 17.12. 2021 г. Лица, вошедшие в исследование, подписали письменное информированное добровольное согласие.

COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS

The study complies with the standards of the Helsinki Declaration, approved by the Independent Committee for Ethics of Kuban State Medical University (4 Mitrofana Sedina str., Krasnodar, Russia), Minutes No. 106 of December 17, 2021. Written informed voluntary consent was obtained from the participants of the study.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Авторы заявляют об отсутствии спонсорской поддержки при проведении исследования.

FUNDING

The authors declare that no sponsorship was received for this study.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Page R.C., Krall E.A., Martin J., Mancil L., Garcia R.I. Validity and accuracy of a risk calculator in predicting periodontal disease. *J. Am. Dent. Assoc.* 2002; 133(5): 569–576. DOI: 10.14219/jada.archive.2002.0232
2. Bui F.Q., Almeida-da-Silva C.L.C., Huynh B., Trinh A., Liu J., Woodward J., Asadi H., Ojcius D.M. Association between periodontal pathogens and systemic disease. *Biomed. J.* 2019; 42(1): 27–35. DOI: 10.1016/j.bj.2018.12.001
3. Chatzopoulos G.S., Koidou V.P. Association between susceptible genotypes to periodontitis and clinical outcomes of periodontal regenerative therapy: A systematic review. *Med. Oral. Patol. Oral. Cir. Bucal.* 2016; 21(4): e456–64. DOI: 10.4317/medoral.21105
4. Lang N.P., Suvan J.E., Tonetti M.S. Risk factor assessment tools for the prevention of periodontitis progression a systematic review. *J. Clin. Periodontol.* 2015; 42 Suppl 16: S59–70. DOI: 10.1111/jcpe.12350
5. Trombelli L., Minenna L., Toselli L., Zaetta A., Checchi L., Checchi V., Nieri M., Farina R. Prognostic value of a simplified method for periodontal risk assessment during supportive periodontal therapy. *J. Clin. Periodontol.* 2017; 44(1): 51–57. DOI: 10.1111/jcpe.12645
6. Farina R., Simonelli A., Baraldi A., Pramstraller M., Minenna L., Toselli L., Maietti E., Trombelli L. Tooth loss in complying and non-complying periodontitis patients with different periodontal risk levels during supportive periodontal care. *Clin. Oral. Investig.* 2021; 25(10): 5897–5906. DOI: 10.1007/s00784-021-03895-8
7. Saminsky M., Halperin-Sternfeld M., Machtei E.E., Horwitz J. Variables affecting tooth survival and changes in probing depth: a long-term follow-up of periodontitis patients. *J. Clin. Periodontol.* 2015; 42(6): 513–519. DOI: 10.1111/jcpe.12419
8. Щекина, Е.Н. Использование системного подхода для создания систем поддержки принятия решений в медицине (обзор литературы). *Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание.* 2017; 2: 356–364. DOI 10.12737/article_58f0b921cab9a8.03255229
9. Ramseier C.A., Nydegger M., Walter C., Fischer G., Sculean A., Lang N.P., Salvi G.E. Time between recall visits and residual probing depths predict long-term stability in patients enrolled in supportive periodontal therapy. *J. Clin. Periodontol.* 2019; 46(2): 218–230. DOI: 10.1111/jcpe.13041
10. Matuliene G., Pjetursson B.E., Salvi G.E., Schmidlin K., Brägger U., Zwahlen M., Lang N.P. Influence of residual pockets on progression of periodontitis and tooth loss: results after 11 years of maintenance. *J. Clin. Periodontol.* 2008; 35(8): 685–695. DOI: 10.1111/j.1600-051X.2008.01245.x
11. Тхатль Л.К., Ставенчук Т.В., Халафян А.А., Космачева Е.Д., Пашкова И.А. Оценка выживаемости реципиентов сердца на основе иммунологического скрининга антител к лейкоцитарным донорским антигенам и ультразвуковых методов диагностики. *Российский кардиологический журнал.* 2019; (8): 44–51. DOI: 10.15829/1560-4071-2019-8-44-51
12. Lang N.P., Bartold P.M. Periodontal health. *J. Clin. Periodontol.* 2018; 45 Suppl 20: S9–S16. DOI: 10.1111/jcpe.12936
13. Shimpi N., McRoy S., Zhao H., Wu M., Acharya A. Development of a periodontitis risk assessment model for primary care providers in an interdisciplinary setting. *Technol. Health. Care.* 2020; 28(2): 143–154. DOI: 10.3233/THC-191642
14. Pini Prato G.P., Di Gianfilippo R., Wang H.L. Success in periodontology: An evolutive concept. *J. Clin. Periodontol.* 2019; 46(8): 840–845. DOI: 10.1111/jcpe.13150
15. Cortellini P., Stalpers G., Mollo A., Tonetti M.S. Periodontal regeneration versus extraction and prosthetic replacement of teeth severely compromised by attachment loss to the apex: 5-year results of an ongoing randomized clinical trial. *J. Clin. Periodontol.* 2011; 38(10): 915–924. DOI: 10.1111/j.1600-051X.2011.01768.x
16. Cortellini P., Buti J., Pini Prato G., Tonetti M.S. Periodontal regeneration compared with access flap surgery in human intra-bony defects 20-year follow-up of a randomized clinical trial: tooth retention, periodontitis recurrence and costs. *J. Clin. Periodontol.* 2017; 44(1): 58–66. DOI: 10.1111/jcpe.12638

REFERENCES

1. Page R.C., Krall E.A., Martin J., Mancil L., Garcia R.I. Validity and accuracy of a risk calculator in predicting periodontal disease. *J. Am. Dent. Assoc.* 2002; 133(5): 569–576. DOI: 10.14219/jada.archive.2002.0232
2. Bui F.Q., Almeida-da-Silva C.L.C., Huynh B., Trinh A., Liu J., Woodward J., Asadi H., Ojcius D.M. Association between periodontal pathogens and systemic disease. *Biomed. J.* 2019; 42(1): 27–35. DOI: 10.1016/j.bj.2018.12.001
3. Chatzopoulos G.S., Koidou V.P. Association between susceptible genotypes to periodontitis and clinical outcomes of periodontal regenerative therapy: A systematic review. *Med. Oral. Patol. Oral. Cir. Bucal.* 2016; 21(4): e456–64. DOI: 10.4317/medoral.21105
4. Lang N.P., Suvan J.E., Tonetti M.S. Risk factor assessment tools for the prevention of periodontitis progression a systematic review. *J. Clin. Periodontol.* 2015; 42 Suppl 16: S59–70. DOI: 10.1111/jcpe.12350
5. Trombelli L., Minenna L., Toselli L., Zaetta A., Checchi L., Checchi V., Nieri M., Farina R. Prognostic value of a simplified method for periodontal risk assessment during supportive periodontal therapy. *J. Clin. Periodontol.* 2017; 44(1): 51–57. DOI: 10.1111/jcpe.12645

- Clin. Periodontol.* 2017; 44(1): 51–57. DOI: 10.1111/jcpe.12645
6. Farina R., Simonelli A., Baraldi A., Pramstraller M., Minenna L., Toselli L., Maietti E., Trombelli L. Tooth loss in complying and non-complying periodontitis patients with different periodontal risk levels during supportive periodontal care. *Clin. Oral. Investig.* 2021; 25(10): 5897–5906. DOI: 10.1007/s00784-021-03895-8
 7. Saminsky M., Halperin-Sternfeld M., Machtei E.E., Horwitz J. Variables affecting tooth survival and changes in probing depth: a long-term follow-up of periodontitis patients. *J. Clin. Periodontol.* 2015; 42(6): 513–519. DOI: 10.1111/jcpe.12419
 8. Shchekina E.N. System analysis for creation of program complexes of medical support systems (literature report). *Journal of New Medical Technologies. eEdition.* 2017; 2: 356–364 (In Russ., English abstract). DOI 10.12737/article_58f0b921cab9a8.03255229
 9. Ramseier C.A., Nydegger M., Walter C., Fischer G., Sculean A., Lang N.P., Salvi G.E. Time between recall visits and residual probing depths predict long-term stability in patients enrolled in supportive periodontal therapy. *J. Clin. Periodontol.* 2019; 46(2): 218–230. DOI: 10.1111/jcpe.13041
 10. Matuliene G., Pjetursson B.E., Salvi G.E., Schmidlin K., Bragger U., Zwahlen M., Lang N.P. Influence of residual pockets on progression of periodontitis and tooth loss: results after 11 years of maintenance. *J. Clin. Periodontol.* 2008; 35(8): 685–695. DOI: 10.1111/j.1600-051X.2008.01245.x
 11. Tkhatl L.K., Stavenchuk T.V., Khalafyan A.A., Kosmacheva E., Pashkova I. Assessment of heart transplant recipients survival based on ultrasound diagnostic methods and immunological screening of antibodies to leukocyte donor antigens. *Russian Journal of Cardiology.* 2019; (8): 44–51 (In Russ., English abstract). DOI: 10.15829/1560-4071-2019-8-44-51
 12. Lang N.P., Bartold P.M. Periodontal health. *J. Clin. Periodontol.* 2018; 45 Suppl 20: S9–S16. DOI: 10.1111/jcpe.12936
 13. Shimpi N., McRoy S., Zhao H., Wu M., Acharya A. Development of a periodontitis risk assessment model for primary care providers in an interdisciplinary setting. *Technol. Health. Care.* 2020; 28(2): 143–154. DOI: 10.3233/THC-191642
 14. Pini Prato G.P., Di Gianfilippo R., Wang H.L. Success in periodontology: An evolutive concept. *J. Clin. Periodontol.* 2019; 46(8): 840–845. DOI: 10.1111/jcpe.13150
 15. Cortellini P., Stalpers G., Mollo A., Tonetti M.S. Periodontal regeneration versus extraction and prosthetic replacement of teeth severely compromised by attachment loss to the apex: 5-year results of an ongoing randomized clinical trial. *J. Clin. Periodontol.* 2011; 38(10): 915–924. DOI: 10.1111/j.1600-051X.2011.01768.x
 16. Cortellini P., Buti J., Pini Prato G., Tonetti M.S. Periodontal regeneration compared with access flap surgery in human intra-bony defects 20-year follow-up of a randomized clinical trial: tooth retention, periodontitis recurrence and costs. *J. Clin. Periodontol.* 2017; 44(1): 58–66. DOI: 10.1111/jcpe.12638

ВКЛАД АВТОРОВ

Перова М.Д.

Разработка концепции — формирование идеи; формулировка и развитие ключевых целей и задач.

Проведение исследования — проведение исследований, в частности, сбор данных; анализ и интерпретация полученных данных.

Подготовка и редактирование текста — составление черновика рукописи, его критический пересмотр с внесением ценного замечания интеллектуального содержания; участие в научном дизайне.

Проведение статистического анализа — применение статистических, математических, вычислительных или иных формальных методов для анализа и синтеза данных исследования.

Утверждение окончательного варианта статьи — принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Ресурсное обеспечение исследования — предоставление пациентов для проведения исследования.

Самохвалова Д.Д.

Разработка концепции — развитие ключевых целей и задач.

Проведение исследования — проведение исследований, в частности, сбор данных; анализ и интерпретация полученных данных.

Подготовка и редактирование текста — критический пересмотр черновика рукописи с внесением ценного замечания интеллектуального содержания.

Утверждение окончательного варианта статьи — принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Ресурсное обеспечение исследования — предоставление пациентов для проведения исследования.

Халафян А.А.

Разработка концепции — формирование идеи; формулировка и развитие ключевых целей и задач.

Проведение исследования — проведение исследований, в частности, анализ и интерпретация полученных данных.

Подготовка и редактирование текста — составление черновика рукописи, его критический пересмотр с внесением ценного замечания интеллектуального содержания; участие в научном дизайне.

Утверждение окончательного варианта статьи — принятие ответственности за все аспекты работы,

целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Проведение статистического анализа — применение статистических, математических, вычислительных или иных формальных методов для анализа и синтеза данных исследования.

Акиншина В.А.

Разработка концепции — развитие ключевых целей и задач.

Проведение исследования — написание программы для ЭВМ.

Подготовка и редактирование текста — критический пересмотр черновика рукописи с внесением ценного замечания интеллектуального содержания.

Утверждение окончательного варианта статьи — принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Проведение статистического анализа — применение статистических, математических, вычислительных или иных формальных методов для анализа и синтеза данных исследования.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Perova M.D.

Conceptualization — concept statement; statement and development of key goals and objectives.

Conducting research — conducting research, in particular, data collection, analysis and interpretation of the data obtained.

Text preparation and editing — drafting of the manuscript, its critical review with the introduction of valuable intellectual content and remarks; contribution to the scientific layout.

Conducting statistical analysis — application of statistical, mathematical, computational or other formal methods for the analysis and synthesis of data.

Approval of the final version of the paper — acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the paper and its final version.

Study resourcing — providing patients for analysis.

Samokhvalova D.D.

Conceptualization — development of key goals and objectives.

Conducting research — conducting research, in particular, data collection, analysis and interpretation of the data obtained.

Text preparation and editing — critical review of a draft manuscript with the introduction of valuable intellectual content and remarks.

Approval of the final version of the paper — acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the paper and its final version.

Study resourcing — providing patients for analysis.

Khalafyan A.A.

Conceptualization — concept statement; statement and development of key goals and objectives.

Conducting research — conducting research, in particular, analysis and interpretation of the data obtained.

Text preparation and editing — drafting of the manuscript, its critical review with the introduction of valuable intellectual content and remarks; contribution to the scientific layout.

Approval of the final version of the paper — acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the paper and its final version.

Conducting statistical analysis — application of statistical, mathematical, computational or other formal methods for the analysis and synthesis of data.

Akinshina V.A.

Conceptualization — development of key goals and objectives.

Conducting research — writing a computer program.

Text preparation and editing — critical review of a draft manuscript with the introduction of valuable intellectual content and remarks.

Approval of the final version of the paper — acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the paper and its final version.

Conducting statistical analysis — application of statistical, mathematical, computational or other formal methods for the analysis and synthesis of data.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Перова Марина Дмитриевна* — доктор медицинских наук, профессор кафедры хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

<https://orcid.org/0000-0001-6974-6407>

Контактная информация: e-mail: mperova2013@yandex.ru; тел.: +7 (938) 474-48-10;

ул. им. Митрофана Седина, д. 4, г. Краснодар, 350063, Россия.

Самохвалова Дина Дмитриевна — аспирант кафедры хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

<https://orcid.org/0000-0001-8853-3343>

Халафян Алексан Альбертович — доктор технических наук, профессор кафедры анализа данных и искусственного интеллекта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет»

<https://orcid.org/0000-0003-2324-3649>

Акиншина Вера Александровна — доцент кафедры анализа данных и искусственного интеллекта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет».

<https://orcid.org/0000-0003-4136-4313>

Marina D. Perova — Dr. Sci. (Med.), Prof., Department of Surgical Dentistry and Maxillofacial Surgery, Kuban State Medical University, Russia.

<https://orcid.org/0000-0001-6974-6407>

Contact information: e-mail: mperova2013@yandex.ru; tel.: +7 (938) 474-48-10;

Mitrofana Sedina str., 4 Krasnodar, 350063, Russia

Dina D. Samokhvalova — PhD student, Department of Surgical Dentistry and Maxillofacial Surgery, Kuban State Medical University, Russia.

<https://orcid.org/0000-0001-8853-3343>

Alexan A. Khalafyan — Dr. Sci. (Engineering), Prof., Department of Data Analysis and Artificial Intelligence, Kuban State University.

<https://orcid.org/0000-0003-2324-3649>

Vera A. Akinshina — Assoc. Prof., Department of Data Analysis and Artificial Intelligence, Kuban State University.

<https://orcid.org/0000-0003-4136-4313>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author