

Гений ортопедии. 2021. Т. 27, № 6. С. 813-820.
Genij Ortopedii. 2021. Vol. 27, no. 6. P. 813-820.

Обзорная статья

УДК 004.8:616.711.9-08

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-6-813-820>

Искусственный интеллект для прогнозирования различных состояний в вертебрологии: систематический обзор

В.С. Переверзев✉, А.И. Казьмин, М.Л. Сажнев, А.А. Пантелеев, С.В. Колесов

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Владимир Сергеевич Переверзев, vcperverz@gmail.com

Аннотация

Введение. Искусственный интеллект (ИИ) – это программные системы в сочетании с применяемыми в них методами и алгоритмами, главной особенностью которых является способность решать интеллектуальные задачи. Одним из наиболее популярных направлений применения ИИ является прогнозирование различных ситуаций, оценка любой цифровой информации с попыткой дать по ней заключение, а также анализ различных данных с поиском скрытых закономерностей. **Дизайн исследования.** Систематический обзор. **Цель.** Оценить текущие возможности искусственного интеллекта (ИИ) для прогноза неблагоприятных состояний в вертебрологии, требующих медицинской помощи, и будущие перспективы развития в этой области. **Материалы и методы.** При помощи протокола (PRISMA) «Предпочтительные параметры отчетности для систематических обзоров и мета-анализа» проведен поиск в системах Medline, Scopus и eLIBRARY до июня 2020 г. с использованием ключевых слов для поиска статей, направленный на то, чтобы обобщить существующие данные, касающиеся алгоритмов прогноза каких-либо патологических состояний в вертебрологии, требующих медицинского вмешательства, с помощью технологий искусственного интеллекта. **Результаты.** Для систематического обзора отобрано 20 публикаций, в которых представлены данные об использовании искусственного интеллекта, машинного обучения, нейронных сетей для прогноза каких-либо состояний в вертебрологии. Согласно проведенному обзору, полученные данные свидетельствуют о том, что ИИ можно успешно применять для оптимизации прогноза при различных заболеваниях позвоночника. Поэтому использование ИИ в клинической практике вертебрологов может улучшить результаты лечения. **Заключение.** Популяризация использования искусственного интеллекта в медицине неизбежна. На сегодняшний день ИИ показывает хорошие результаты в области принятия врачом клинических решений и способности прогнозировать результаты лечения в зависимости от тех или иных факторов. Необходимо, чтобы спинальные хирурги осознали потенциал этих новых технологий. Тем не менее, некоторые факторы, которые определяют клиническое применение искусственного интеллекта, такие как способность учитывать контекст анамнеза пациента, трудно рассчитать математически, и поэтому они затруднительны для алгоритмического подхода. В конечном счете, врачи будут продолжать играть жизненно важную роль в лечении пациентов, и искусственный интеллект не обесценит их клинические навыки, а сделает их еще более важными.

Ключевые слова: искусственный интеллект, систематический обзор, машинное обучение, вертебрологи, нейронные сети в вертебрологии, прогноз в вертебрологии

Для цитирования: Искусственный интеллект для прогнозирования различных состояний в вертебрологии: систематический обзор / В.С. Переверзев, А.И. Казьмин, М.Л. Сажнев, А.А. Пантелеев, С.В. Колесов // Гений ортопедии. 2021. Т. 27, № 6. С. 813-820. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-6-813-820>.

Review article

Artificial intelligence for predicting various conditions in spine surgery: a systematic review

V.S. Pereverzev✉, A.I. Kazmin, M.L. Sazhnev, A.A. Panteleev, S.V. Kolesov

National Priorov Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Vladimir S. Pereverzev, vcperverz@gmail.com

Abstract

Introduction Artificial intelligence (AI) includes software systems combined with applied methods and algorithms which main feature is the ability to solve intellectual problems. One of the most popular trend of AI application is the prognosis of various situations, evaluation of any digital information with an attempt to give a conclusion and analysis of different data with a search for hidden patterns. **Study design** Systematic review. **Purpose** To assess current possibilities of artificial intelligence (AI) for predicting unfavorable conditions in spine surgery that require medical care, and future development prospects in this area. **Materials and methods** Until June 2020 we performed a search using the Protocol (PRISMA) "Preferred Reporting Parameters for Systematic Reviews and Meta-analyses" and keywords for articles in Medline, Scopus and eLIBRARY intended to summarize the available data on algorithms for predicting any pathological conditions in spine surgery that require medical intervention using artificial intelligence technologies. **Results** 20 publications were selected for systematic review, which presented data on the application of artificial intelligence, machine learning and neural networks to predict any condition in spine surgery. According to the review, the data obtained indicate that AI can be successfully used to optimize prognosis in various diseases of the spine. Therefore, the application of AI in the clinical practice of the spine surgeons can improve treatment results. **Conclusion** The promotion of artificial intelligence application in medicine is inevitable. Currently AI shows good results in the area of making clinical decisions by the surgeons and the ability to predict treatment results depending on certain factors. It is imperative that spinal surgeons should realize the potential of these new technologies. Nevertheless, some factors that determine the clinical application of artificial intelligence, i.e. the ability to consider the context of a patient's history, are difficult to calculate mathematically and, so far, are difficult for an algorithmic approach. Eventually, the doctors will continue to play a vital role in patients' treatment, and artificial intelligence will not depreciate their clinical skills, but make them even more important.

Keywords: artificial intelligence, systematic review, machine learning, spine surgeons, neural networks in spine surgery, prognosis in spine surgery

For citation: Pereverzev V.S., Kazmin A.I., Sazhnev M.L., Panteleev A.A., Kolesov S.V. Artificial intelligence for predicting various conditions in spine surgery: a systematic review. *Genij Ortopedii*, 2021, vol. 27, no 6, pp. 813-820. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-6-813-820>.

ВВЕДЕНИЕ

Возможности машинного обучения и искусственного интеллекта сегодня возрастают быстрее, чем когда-либо прежде. Значительные успехи в обработ-

ке информации позволяют достичь беспрецедентного уровня точности при анализе больших баз данных [1]. Это можно увидеть на примере появления и исполь-

зования электронной медицинской документации, что позволило увеличить количество и качество доступных сведений и дало возможность медицинскому персоналу анализировать и лучше понимать, какие факторы позволяют повысить качество оказания помощи пациентам [2]. В этой ситуации могут помочь информационные системы, Big Data («большие данные» – термин, которым принято называть огромные массивы информации со сложной неоднородной и/или неопределенной структурой) и искусственный интеллект (ИИ).

На сегодняшний день к ИИ относят различные программные системы и применяемые в них методы и алгоритмы, главной особенностью которых является способность решать интеллектуальные задачи так, как это делал бы размышляющий над их решением человек. Одно из наиболее популярных направлений применения ИИ является прогнозирование различных ситуаций, оценка любой цифровой информации с попыткой дать по ней заключение, а также анализ различных данных с поиском скрытых закономерностей (data mining) [1].

ИИ приобрел огромную популярность в последнее время: поисковые системы, навигатор в автомобиле и многие другие вещи, которые незаметно стали ча-

стью нашей повседневной жизни. Исследования, основанные на ИИ, также проводятся во многих областях медицины и показывают большие перспективы в повышении эффективности клинического подхода, персонализации, управлении и научной деятельности [3].

Самой популярной областью исследований ИИ является интерпретация изображений. Использование ИИ помогает повысить специалисту точность диагностики и предотвратить ошибки, но не заменяет врача-рентгенолога. Паттерны нейронных сетей применены к различным условиям, включая диагностику костного возраста пациента, переломов позвонков, минеральной плотности костной ткани и т.д. [4]. Данный обзор направлен на то, чтобы обобщить существующие данные, касающиеся алгоритмов прогноза различных патологических состояний в вертебрологии, требующих медицинского вмешательства, с помощью технологий искусственного интеллекта.

Дизайн исследования – систематический обзор.

Цель – оценить текущие возможности искусственного интеллекта (ИИ) для прогноза неблагоприятных состояний в вертебрологии, требующих медицинской помощи, и будущие перспективы развития в этой области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С помощью протокола (PRISMA) «Предпочтительные параметры отчетности для систематических обзоров и мета-анализа» [5] проведен детальный поиск оригинальных статей в базах данных Medline, Scopus и eLIBRARY – изучены публикации до июня 2020 года, используя комбинации поисковых запросов на английском и русском языках «Artificial Intelligence in spine surgery», «Artificial Intelligence in Spinal Diseases», «Spinal prognosis», «искусственный интеллект в хирургии позвоночника», «прогноз в вертебрологии», «прогноз», «нейронные сети», «искус-

ственный интеллект». Ключевые слова были выбраны в связи с их вероятностью упоминания в заголовке или резюме соответствующих публикаций. Изначально статьи отобраны по названию, затем детально изучены. Выполнен дополнительный поиск ссылок из полученных документов. К рассмотрению приняты статьи, в которых представлены данные об использовании искусственного интеллекта, машинного обучения, нейронных сетей при хирургическом лечении каких-либо заболеваний позвоночника, в частности прогноза в вертебрологии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изначально найдено 64 статьи в базах данных Medline, Scopus и eLIBRARY. Одна из них опубликована не на английском или русском языках, еще четыре исключены из-за дублирования. Из 59-ти 26 изъяты, так как не подходили по критериям включения. Еще шесть были исключены из-за недостаточ-

ной информации об использовании разработок для прогноза. Материалы конференций (n = 4) и письма редакторов (n = 3) для анализа также не подошли. Итого в обзор включено 20 статей, этапы отбора представлены на рисунке 1. Резюме проведенного поиска – в таблице 1.

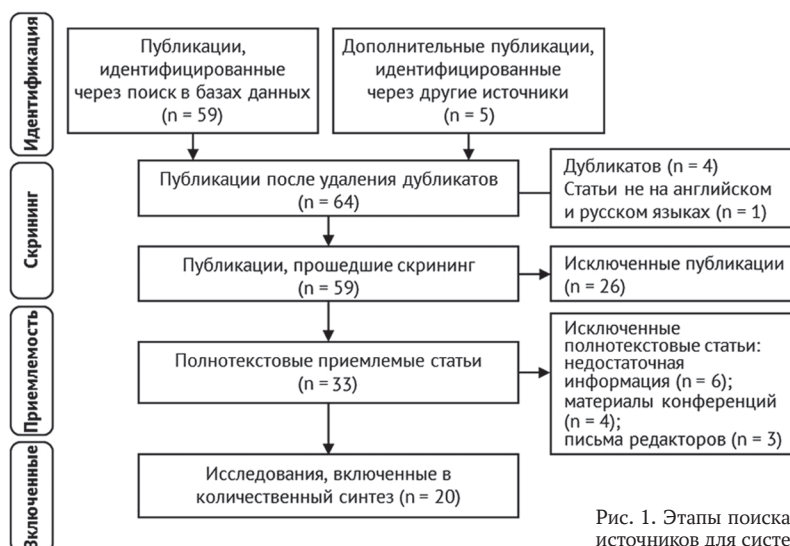


Рис. 1. Этапы поиска и отбора литературных источников для систематического обзора

Большое количество из отобранных статей посвящено боли в спине и дегенеративному поражению позвоночника. Так, существуют системы поддержки для принятия клинических решений и рекомендации по диагностике и лечению боли в поясничном отделе позвоночника [6]. Данный подход позволяет систематизировать текущее состояние пациента, а даль-

нейшее развитие подобных систем поможет врачу правильно и своевременно определить направление лечения, в этом заключается преимущество перед принятием решения в одиночку. Таким образом, появится возможность корректного распределения количества выполняемых услуг и повышения их доступности для населения.

Таблица 1

Список работ по прогнозированию в вертебрологии с использованием искусственного интеллекта

Авторы	Год	Страна	Состояние	Пациенты/ обзор	Цель работы	Вывод/заключение/результат
Dickey J.P. и соавт. [7]	2002	США	Боль внизу спины	9	Изучить взаимосвязь между межпозвоночными движениями, деформацией позвоночного канала и болью у пациентов с хроническим болевым синдромом внизу спины	Модель нейронной сети показала тесную связь между наблюдаемой и прогнозируемой болью. Искусственные нейронные сети способны эффективно оценивать взаимосвязь между болью и движением позвонков при хроническом болевом синдроме внизу спины
Hill J.C. и соавт. [6]	2008	Великобритания	Неспецифическая боль в спине	500	Разработать и валидизировать инструмент, который проверяет прогностические показатели боли в спине для первоначального принятия решений при первичной медицинской помощи	Предложен оснаждающий инструмент для скрининга и выявления потенциальных кандидатов с болями в спине с целью раннего оказания первичной медицинской помощи. Дальнейшая работа позволит улучшить распределение результатов по подгруппам, использующим инструмент, соответствующее целям лечения
Parsaeian M. и соавт. [8]	2012	Иран	Боль внизу спины	17295	Сравнить эмпирически прогнозирующую способность искусственной нейронной сети с логистической регрессией в прогнозировании боли внизу спины	Основываясь на критериях сравнения, искусственная нейронная сеть даст лучшую производительность, чем логистическая регрессия. Хотя разница статистически значима, она не представляется клинически значимой
Papić M. и соавт. [9]	2016	Сербия	Грыжа диска в поясничном отделе	145	Прогнозировать возвращение на работу после хирургического лечения грыжи межпозвонкового диска	Прогностическое моделирование выявило наиболее решающие факторы риска при продлении срока невозвращения на работу: психосоциальные факторы, подвижность позвоночника и структурные изменения фасеточных суставов, а также профессиональные факторы, включая положение стоя, сидя и микроклимат на рабочем месте
Lafage R. и соавт. [10]	2018	США	Баланс позвоночника	Обзор	Планирование и прогнозирование послеоперационного баланса позвоночника с использованием самообучающихся систем	Интеграция новых технологий может изменить текущий способ планирования / моделирования в хирургии. Использование мощных автоматизированных инструментов, которые могут интегрировать несколько параметров и учиться на собственном опыте, могут изменить традиционный способ выбора путей лечения и консультирования пациентов. Однако предстоит еще большая работа, чтобы достичь желаемого уровня. Многие из этих инструментов уже существуют в немедицинских областях, и их адаптация к хирургии позвоночника представляет значительный интерес
Arvind V. и соавт. [11]	2018	США	Дискэктомия в шейном отделе	14615	Демонстрация эффективности моделей машинного обучения в прогнозировании послеоперационных осложнений после передней шейной дискэктомии и спондилодеза	Алгоритмы нейронных сетей и логистической регрессии превосходят классификацию оценки физического состояния Американской ассоциации анестезиологов для прогнозирования отдельных послеоперационных осложнений. Кроме того, нейронные сети обладают большей чувствительностью, чем логистическая регрессия, при прогнозировании смертности и осложнений, связанных с заживлением раны. С ростом объема медицинских данных развития машинного обучения на больших объемах информации появляется возможность улучшить прогнозирование риска благодаря имеющимся ресурсам, что делает их отличными инструментами в сложных клинических ситуациях
Karhade A.V. и соавт. [12]	2018	США	Дегенеративные изменения в поясничном отделе	26364	Использование машинного обучения для разработки веб-приложения с открытым доступом для предоперационного прогнозирования нестандартных показаний в хирургии при плановых операциях по поводу дегенеративных заболеваний поясничного отдела позвоночника	Частота нестандартных показаний у 26 364 пациентов, перенесших плановую операцию по поводу дегенеративных заболеваний диска поясничного отдела, составила 9,28 %. Алгоритмы машинного обучения показали многообещающие результаты по внутренней валидации для предоперационного прогнозирования нестандартных показаний
Karhade A.V. и соавт. [13]	2018	США	Хордома позвоночника	265	Разработать модели машинного обучения для прогнозирования выживаемости и использовать их в качестве веб-приложений с открытым доступом в качестве доказательства концепции машинного обучения при редких поражениях нервной системы	Анализ пациентов с хордому позвоночника показал, что модели машинного обучения могут быть разработаны для прогнозирования выживаемости при редких патологиях и могут послужить основой для создания инструментов поддержки принятия решений в будущем

Список работ по прогнозированию в вертебрологии с использованием искусственного интеллекта

Kim J.S. и соавт. [14]	2018	США	Задний спондилодез в поясничном отделе позвоночника	22629	Изучение и проверка моделей машинного обучения для выявления факторов риска осложнений после заднего спондилодеза поясничного отдела позвоночника.	Машинное обучение в форме логистической регрессии не были более точными, чем эталонные оценки Американской ассоциации анестезиологов для выявления факторов риска развития осложнений после заднего спондилодеза поясничного отдела позвоночника, что позволяет предположить, что они являются потенциально лучшими инструментами для анализа факторов риска в хирургии позвоночника.
Ghogawala Z. и соавт. [15]	2019	США	Дегенеративный спондилолистез	Обзор	Обзор использования передовых вычислительных технологий, в частности искусственного интеллекта и смежной области машинного обучения, для моделирования и прогнозирования на основании факторов, влияющих на принятие решений хирургами, и, таким образом, разработать подходы к созданию диагностических рекомендаций, которые могут быть применены на практике в клинических ситуациях, что приведет к улучшению хирургических результатов	Последние разработки в области вычислительной мощности наряду с усилиями по сбору цифровых медицинских данных позволяют предположить, что технология искусственного интеллекта может быть использована для прогнозирования того, у каких пациентов будет развиваться нестабильность после ламинэктомии, и для обеспечения оптимального отбора пациентов для применения имплантов в поясничном отделе позвоночника
Ames C.P. и соавт. [16]	2019	Мультицентр.	Сколиоз у взрослых	570	Применить иерархическую кластеризацию на основе искусственного интеллекта в качестве шага к разработке классификации, которая оптимизирует общее качество, необходимость и безопасность хирургии сколиоза у взрослых	Неконтролируемая иерархическая кластеризация может идентифицировать шаблоны данных, которые могут способствовать принятию предоперационных решений посредством построения двухлетней сетки риск-выгода. В дополнение к созданию новой классификации сколиоза взрослых на основе искусственного интеллекта идентификация паттернов может облегчить оптимизацию лечения, обучая хирургов, в случаях, когда паттерны лечения дают оптимальное улучшение с минимальным риском
Joshi R.S. и соавт. [17]	2019	США	Сколиоз у взрослых	Обзор	Обзор прогностических моделей и машинного обучения для лечения сколиоза у взрослых	В совокупности все исследования отражают общие усилия хирургов и математиков со всего мира по развитию хирургии сколиоза взрослых в современном технологическом веке. Возможность использовать передовые вычислительные методы существенно повлияет на уход за пациентами. Оставаясь на переднем крае технологических достижений, хирурги-вертебрологи будут и впредь стремиться предоставлять пациентам максимально полезные данные, чтобы оптимизировать процесс предоперационных посещений клиник и принимать решения врач-пациент. Следующими шагами будет дальнейшее развитие технологии искусственного интеллекта, применение ее непосредственно для принятия клинических решений и обеспечения доступности технологии для хирургов. В достижении этого хирургия сколиоза взрослых действительно начала охватывать эру персонализированной медицины
Han S.S. и соавт. [18]	2019	США	Хирургия позвоночника	1 106 234	Разработать и оценить набор прогностических моделей пространственных нежелательных явлений после операции на позвоночнике	Представлен набор прогностических моделей для неблагоприятных событий после операции на позвоночнике, которые учитывают факторы, связанные с пациентом, диагнозом и процедурой, могут способствовать процессу консультирования пациента, точной корректировке риска
Bertsimas D. и соавт. [19]	2019	США	Повреждение шейного отдела позвоночника у детей	Без/с повреждением 9533/119	Разработка высокоточных правил принятия клинических решений для прогнозирования повреждения шейного отдела позвоночника у детей с использованием методов машинного обучения	В этом исследовании разработано правило принятия решения, позволяющее выявлять травмы с высокой степенью вероятности при одновременном уменьшении ненужных исследований. Это демонстрирует ценность машинного обучения для улучшения протоколов клинических решений при детской травме
Schwartz J.T. и соавт. [2]	2019	США	Хирургия позвоночника	Обзор	Обзор и обсуждение текущего состояния машинного обучения с использованием электронных медицинских карт применительно к хирургии позвоночника	Электронные медицинские карты представляют собой богатый источник медицинских данных, и алгоритмы машинного обучения могут быть в состоянии успешно использовать ценность этих данных для применения в хирургии позвоночника. Уже достигнут прогресс в использовании алгоритмов машинного обучения для чтения рентгенограмм, создания отчетов и прогнозирования клинических результатов с впечатляющими результатами
Staartjes V.E. и соавт. [20]	2019	Нидерланды	Микродискектомия грыжи диска поясничного отдела позвоночника	422	Оценить возможность получения надежной, основанной на глубоком обучении, прогностической аналитики на базе моноцентровых данных, полученных одним хирургом	Исследование показывает, что создание персонализированной и надежной аналитики, основанной на «глубоком обучении» для прогнозирования результатов, возможно даже при ограниченном количестве данных, специфичных для отдельного центра. При проспективной валидации возможность предоперационного и надежного информирования пациентов о вероятности улучшения симптомов может оказаться полезной для консультирования пациентов и совместного принятия решений

Список работ по прогнозированию в вертебрологии с использованием искусственного интеллекта

Weber K.A. и соавт. [21]	2019	США	Инфильтрация мышц жировой тканью после травмы шейного отдела позвоночника	39	Автоматическая количественная оценка инфильтрации мышц жировой тканью после хлыстовой травмы шейного отдела позвоночника	Нейронные сети могут улучшить эффективность и объективность измерений мышц, позволяя количественно контролировать свойства мышц при повреждениях шейного отдела позвоночника
Ryu S.M. и соавт. [22]	2020	Южная Корея	Хондросаркома позвоночника и таза	1088	Прогноз выживаемости при хондросаркоме позвоночника и таза	Это исследование является первым для анализа данных на уровне популяции с использованием алгоритмов искусственной нейронной сети и машинного обучения для определения роли и результатов хирургической резекции и лучевой терапии при хондросаркоме позвоночника и таза
Azimi P. и соавт. [23]	2020	Мультицентр	Заболевания позвоночника	Обзор	Обзор направлен на выявление роли искусственного интеллекта при заболеваниях позвоночника	Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что искусственный интеллект можно успешно использовать для оптимизации постановки диагноза, прогноза и прогноза результата лечения при заболеваниях позвоночника. Следовательно, включение ИИ в клиническую практику лечения заболеваний позвоночника может улучшить принятие клинических решений
Hopkins B.S. и соавт. [24]	2020	США	Инфекционные осложнения после заднего спондилодеза	4046	Прогнозирование риска развития инфекционных осложнений после заднего спондилодеза с применением искусственного интеллекта	Машинное обучение и искусственный интеллект являются важными и эффективными инструментами, которые следует использовать при принятии клинических решений. Сопутствующая патология являлась основным фактором риска развития инфекционных осложнений. Однако для того, чтобы сделать какие-то окончательные выводы, необходимы дальнейшие исследования

С помощью ИИ Ghogawala Z. и соавт. в 2019 году проведено исследование, касающееся подходов к хирургическому лечению дегенеративного спондилолистеза на уровне поясничного отдела позвоночника. Согласно исследованию, большинство пациентов со спондилолистезом в поясничном отделе позвоночника подвергаются операции по формированию спондилодеза, что намного дороже по сравнению с изолированной декомпрессией, по крайней мере, в краткосрочной перспективе. Опубликованные по поводу дегенеративного поясничного спондилолистеза данные позволяют предположить, что большинство пациентов может быть успешно пролечено только с помощью декомпрессии в поясничном отделе позвоночника, а количество пациентов, у которых в отдаленные сроки формируется нестабильность на уровне операции, незначительно. При этом нестабильность может быть успешно устранена при проведении операции по формированию костного блока. Недавние разработки в области вычислительной мощности наряду с усилиями по сбору цифровых медицинских данных позволяют предположить, что технология искусственного интеллекта применима для прогнозирования того, у каких пациентов может развиваться отсроченная нестабильность. Таким образом, по данным исследования с использованием ИИ сделан вывод, что не все пациенты с дегенеративным спондилолистезом нуждаются в фиксации [25]. А для определения оптимальных показаний к тому или иному подходу требуется формирование более крупной базы данных для создания алгоритма решений [15]. Есть исследование, где впервые продемонстрировано использование неконтролируемого обучения через иерархическую кластеризацию для создания новой системы классификации деформаций позвоночника у взрослых [16]. В настоящее время эта инициатива перенята Joshi R.S. и соавт. (2019), объединивших свою работу с разработкой калькулятора для оценки риска при хирургии сколиоза взрослых, который способен

прогнозировать осложнения, повторное вмешательство и конкретные результаты улучшения качества жизни на срок до 2 лет на основе введенных переменных, специфичных для пациента [17]. Валидация результатов данных исследований приведет к широкому распространению аналогичных инструментов облегчения принятия решений для спинальных хирургов. Представлен набор прогностических моделей и неблагоприятных факторов после операции на позвоночнике, которые учитывают факторы, связанные с пациентом, диагнозом и характером вмешательства, что может способствовать более частому осмотру пациента, точной корректировке риска и точным показателям результатов [18]. Нейросети протестированы в области прогнозирования возникновения боли внизу спины с целью автоматического прогнозирования и выявления факторов риска для развития осложнений после операции по формированию костного блока на уровне поясничного отдела позвоночника [14], а также для разработки и оценки отбора прогностических моделей распространенных нежелательных последствий после операции на позвоночнике [18].

В исследовании Bertsimas D. и соавт. (2019) использованы методы машинного обучения для разработки высокоточных правил принятия клинических решений для прогнозирования травмы шейного отдела у детей [19]. Это демонстрирует ценность машинного обучения в улучшении протоколов клинических решений для детской травмы.

Предоперационный прогноз длительного послеоперационного назначения опиоидов способен помочь выявить кандидатов, которым требуется более внимательное наблюдение после операции по поводу грыжи диска на уровне поясничного отдела позвоночника [26]. Таким образом, ориентированные на пациента клинические прогнозы улучшают как совместное принятие решений, так и качество оказания медицинской помощи.

В то время как современные прогностические модели требуют работы с ограниченными гипотезами, методы машинного обучения могут включать в себя гораздо больше переменных. Информация может быть приоритетной и, таким образом, влиять на принятие решений на разных уровнях. Разработка мощных компьютерных прогностических моделей включает интеграцию нескольких источников информации: рентгенографические параметры (лежа, стоя и т.д.), МРТ, КТ и др.; демографическая информация, такая как возраст, пол и ИМТ, а также такие параметры как качество мышц, проприоцепция, данные анализа походки. Используя машинное обучение, в частности распознавание и моделирование формы, компьютерные методы имеют возможность прогнозировать баланс позвоночника и выявлять предполагаемые патологические зоны и компенсационные механизмы, а затем предложить адекватные хирургические решения [10]. Обсуждаются исследования нейросетей в области обработки электронных медицинских карт пациентов отделений хирургии позвоночника: данных изображений, текстовых и структурированных данных. Возможности применения включают, среди прочего, клиническое прогнозирование, предоперационное планирование, диагностику и своевременную медицинскую помощь. Описывают также возможные ограничения и будущие проблемы законодательства [2]. Имеющиеся данные Karhade A.V. и соавт. (2018) свидетельствуют о том, что ИИ может быть успешно использован при различных заболеваниях позвоночника для верификации диагноза, прогноза и предсказания результатов. Кроме того, нейронные сети полезны для разработки новых вычислительных инструментов с целью прогнозирования клинических исходов, сроков возвращения на работу, физической нетрудоспособности, возникновения осложнений, необходимости раннего повторного приема, способности ходить, сроков выписки после операции на позвоночнике [9, 27, 28]. Методы нейронных сетей также применяли для разработки прогностических алгоритмов послеоперационных осложнений после передней шейной дискэктомии и спондилодезе [11], а также для оценки

клинически значимого улучшения при боли в нижних конечностях, спине и функциональной недостаточности после операции по поводу грыжи диска на уровне поясничного отдела позвоночника [20] и для автоматической количественной оценки жировой инфильтрации мышц после хлыстового повреждения шейного отдела позвоночника [21]. Дальнейшая переподготовка алгоритмов нейронных сетей, обобщение моделей, стандартизация данных в нейронных сетях и сосредоточение внимания на их применении в качестве инструмента в клинической практике спинального хирурга увеличат эффективность принятия решений [23]. Karhade A.V. и соавт. в 2018 г. проведен анализ пациентов с хордойой позвоночника, который показал, что модели машинного обучения разработаны и используются для прогноза выживаемости при редких патологиях [13]. Ryu и соавт. в 2020 году показали, что оценка вероятности выживания с помощью нейронных сетей является допустимым методом для прогнозирования у пациентов с хондросаркомой позвоночника и таза [22]. Hopkins B.S. и соавт. в 2020 году впервые опубликовали применение ИИ для прогноза факторов риска развития инфекционных осложнений после операции на позвоночнике. Положительное прогностическое значение, показывающее, насколько хорошо модель предсказывала риск инфекции, составило 92,56 %. Отрицательное прогностическое значение, демонстрирующее, насколько хорошо модель предсказывала отсутствие риска развития инфекционных осложнений, составило 98,45 %. Наибольшая вероятность осложнений была связана, в основном, с сопутствующей патологией: хроническая сердечная недостаточность, хроническая легочная недостаточность, гемиплегия / параплегия и СПИД / ВИЧ. Лица мужского пола и белой расы оказались в меньшей степени подвержены инфекционным осложнениям. Кроме того, было отмечено, что пребывание в отделении интенсивной терапии и повышение индекса коморбидности Чарлсона требуют большего внимания в связи с увеличением риска развития осложнений [24]. Однако для того, чтобы сделать какие-либо окончательные выводы, необходимы дальнейшие исследования.

ОБСУЖДЕНИЕ

Операция по декомпрессии позвоночного канала в области поясничного отдела позвоночника (стеноз или грыжа диска) является одним из наиболее распространенных хирургических вмешательств в спинальной хирургии. Согласно опросу Американской ассоциации спинальных хирургов в 2013 г. в общей сложности 50 % опрошенных хирургов-вертебрологов хотя бы раз выполняли операцию на неправильном уровне и 10 % – не с той стороны в области поясничного отдела позвоночника [29]. Эти цифры сопоставимы с аналогичными данными других авторов [30]. В то же время, медицинские ошибки – третья по счету причина смерти пациентов [31]. Поиск новых подходов, позволяющих избежать потенциальных ошибок, позволит значительно повысить качество оказываемой помощи пациентам.

За последние несколько лет число публикаций по поводу применения нейронных сетей при заболеваниях позвоночника значительно увеличилось, причем большинство работ посвящено диагностике, за которыми стали следовать работы по прогнозированию.

Безусловно, наиболее известной и обсуждаемой разработкой на основе ИИ в медицине является продукт американской компании IBM – Watson [32]. Изначально проект разрабатывали для помощи врачам в диагностике онкологических заболеваний и подборе эффективного способа терапии, что, следовательно, привело к снижению затрат на лечение. На сегодняшний день принципы машинного обучения стали применять и в других областях медицины (кардиология [33], офтальмология [34], эндокринология [35] и т.д.). В нашем центре на платформе IBM Power AI Vision в настоящее время проводятся исследования и создается модель распознавания злокачественных опухолей костно-суставной системы [36].

Ряд разработок по использованию ИИ в вертебрологии сосредоточен на предоперационной оценке, планировании, интраоперационной помощи и прогнозировании результатов в хирургии позвоночника. Недавно успешно разработано современное использование модели логистической регрессии для прогнозирования ре-

зультатов при формировании костного блока на уровне поясничного отдела позвоночника [25]. Weber К.А. и соавт. разработали модель инструмента клинического прогнозирования, чтобы определить вероятность улучшения функции позвоночника, боли в спине и в ногах у пациентов с фиксацией поясничного отдела через 1 год после операции. Эта модель показала высокую точность при валидации [21]. Эти же авторы разработали модели прогнозирования, опубликованные в открытом доступе, где врач и пациент по отдельности или совместно могут ввести индивидуальные демографические данные, чтобы спрогнозировать вероятность получения хорошего результата при операции по формированию костного блока на уровне поясничного отдела позвоночника. Кроме того, разработан инструмент машинного обучения для прогнозирования длительного послеоперационного назначения опиатов у пациентов, перенесших операцию на поясничном отделе позвоночника [26].

Кроме того, Karhade и соавт. (2018) [37, 38] разработали инструмент машинного обучения для автоматического прогнозирования смертности при метастатическом поражении позвоночника. Предполагается, что эти исследования позволят значительно сократить затраты на лечение.

Конечно, инвестиции в исследования, необходимые для разработки систем прогнозирования в области искусственного интеллекта, требуют больших технических знаний и цифровой инфраструктуры, недоступных большинству спинальных хирургов. В условиях

ограниченных финансовых ресурсов в отдельной организации трудно обосновать необходимые большие расходы на стратегические разработки в области ИИ, особенно при конкуренции с затратами на обеспечение клиники. Это дает возможность другим заинтересованным сторонам анализировать прогресс развития этой технологии. Например, компании по поставке медицинского оборудования значимо более заинтересованы в исследовании и продвижении искусственного интеллекта в медицине, а вовлечение в этот процесс хирургов-вертебрологов также необходимо для обеспечения правильного внедрения ИИ. По нашему мнению, ИИ следует рассматривать как инструмент, помогающий врачам лучше оказывать медицинскую помощь, так же как новый имплант, метод визуализации или навигации. Таким образом, при внедрении и использовании ИИ важно убедиться, что данные разработки направлены на повышение качества оказания медицинской помощи, а не увеличение прибыли спонсоров и разработчиков. А клиницисты должны признать, что успешное использование методов машинного обучения может улучшить результаты лечения пациентов с различными заболеваниями позвоночника. Согласно проведенному обзору, полученные данные свидетельствуют о том, что ИИ можно успешно использовать для оптимизации прогноза при различных заболеваниях позвоночника. Поэтому использование ИИ в клинической практике при различных заболеваниях позвоночника может улучшить результаты лечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Популяризация использования искусственного интеллекта в медицине неизбежна. На сегодняшний день ИИ показывает хорошие результаты в области принятия врачом клинических решений и способности прогнозировать результаты лечения в зависимости от тех или иных факторов. Необходимо, чтобы спинальные хирурги осознали потенциал этих новых технологий. Тем не менее, некоторые факторы, которые опреде-

ляют клиническое применение искусственного интеллекта, такие как способность учитывать контекст анамнеза пациента, трудно рассчитать математически, и поэтому они затруднительны для алгоритмического подхода. В конечном счете, врачи будут продолжать играть жизненно важную роль в лечении пациентов, и искусственный интеллект не обесценит их клинические навыки, а сделает их еще более важными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гусев А.В., Добридин С.Л. Искусственный интеллект в медицине и здравоохранении // Информационное общество. 2017. № 4-5. С. 78-93.
2. Applications of Machine Learning Using Electronic Medical Records in Spine Surgery / J.T. Schwartz, M. Gao, E.A. Geng, K.S. Mody, C.M. Mikhail, S.K. Cho // *Neurospine*. 2019. Vol. 16, No 4. P. 643-653. DOI: 10.14245/ns.1938386.193.
3. Panchmatia J.R., Vissenio M.R., Panch T. The role of artificial intelligence in orthopaedic surgery // *Br. J. Hosp. Med. (Lond)*. 2018. Vol. 79, No 12. P. 676-681. DOI: 10.12968/hmed.2018.79.12.676.
4. Artificial Intelligence in Musculoskeletal Imaging: Current Status and Future Directions / S. Gyftopoulos, D. Lin, F. Knoll, A.M. Doshi, T.C. Rodrigues, M.P. Recht // *AJR Am. J. Roentgenol*. 2019. Vol. 213, No 3. P. 506-513. DOI: 10.2214/AJR.19.21117.
5. Knobloch K., Yoon U., Vogt P.M. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses (PRISMA) statement and publication bias // *J. Craniomaxillofac. Surg.* 2011. Vol. 39, No 2. P. 91-92. DOI: 10.1016/j.jcms.2010.11.001.
6. A primary care back pain screening tool: identifying patient subgroups for initial treatment / J.C. Hill, K.M. Dunn, M. Lewis, R. Mullis, C.J. Main, N.E. Foster, E.M. Hay // *Arthritis Rheum*. 2008. Vol. 59, No 5. P. 632-641. DOI: 10.1002/art.23563.
7. Relationship between pain and vertebral motion in chronic low-back pain subjects / J.P. Dickey, M.R. Pierrynowski, D.A. Bednar, S.X. Yang // *Clin. Biomech. (Bristol, Avon)*. 2002. Vol. 17, No 5. P. 345-352. DOI: 10.1016/s0268-0033(02)00032-3.
8. Comparison of logistic regression and artificial neural network in low back pain prediction: second national health survey / M. Parsaeian, K. Mohammad, M. Mahmoudi, H. Zeraati // *Iran J. Public Health*. 2012. Vol. 41, No 6. P. 86-92. PMID: PMC3469002.
9. Return to Work after Lumbar Microdiscectomy – Personalizing Approach through Predictive Modeling / M. Papić, S. Brdar, V. Papić, T. Lončar-Turukalo // *Stud. Health Technol. Inform.* 2016. Vol. 224. P. 181-183.
10. Self-learning computers for surgical planning and prediction of postoperative alignment / R. Lafage, S. Pesenti, V. Lafage, F.J. Schwab // *Eur. Spine J.* 2018. Vol. 27, No Suppl 1. P. 123-128. DOI: 10.1007/s00586-018-5497-0.
11. Predicting Surgical Complications in Adult Patients Undergoing Anterior Cervical Discectomy and Fusion Using Machine Learning / V. Arvind, J.S. Kim, E.K. Oermann, D. Kaji, S.K. Cho // *Neurospine*. 2018. Vol. 15, No 4. P. 329-337. DOI: 10.14245/ns.1836248.124.
12. Development of machine learning and natural language processing algorithms for preoperative prediction and automated identification of intraoperative vascular injury in anterior lumbar spine surgery / A.V. Karhade, M.E.R. Bongers, O.Q. Groot, T.D. Cha, T.P. Doorly, H.A. Fogel, S.H. Hershtman, D.G. Tobert, S.D. Srivastava, C.M. Bono, J.D. Kang, M.B. Harris, J.H. Schwab // *Spine J.* 2020. S1529-9430(20)30135-2. DOI: 10.1016/j.spinee.2020.04.001.
13. Development of Machine Learning Algorithms for Prediction of 5-Year Spinal Chordoma Survival / A.V. Karhade, Q. Thio, P. Ogink, J. Kim, S. Lozano-Calderon, K. Raskin, J.H. Schwab // *World Neurosurg.* 2018. Vol. 119. P. e842-e847. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.07.276.

14. Examining the Ability of Artificial Neural Networks Machine Learning Models to Accurately Predict Complications Following Posterior Lumbar Spine Fusion / J.S. Kim, R.K. Merrill, V. Arvind, D. Kaji, S.D. Pasik, C.C. Nwachukwu, L. Vargas, N.S. Osman, E.K. Oermann, J.M. Caridi, S.K. Cho // *Spine (Phila Pa 1976)*. 2018. Vol. 43, No 12. P. 853-860. DOI: 10.1097/BRS.0000000000002442.
15. Ghogawala Z., Dunbar M.R., Essa I. Lumbar spondylolisthesis: modern registries and the development of artificial intelligence // *J. Neurosurg. Spine*. 2019. Vol. 30, No 6. P. 729-735. DOI: 10.3171/2019.2.SPINE18751.
16. Artificial Intelligence Based Hierarchical Clustering of Patient Types and Intervention Categories in Adult Spinal Deformity Surgery: Towards a New Classification Scheme that Predicts Quality and Value / C.P. Ames, J.S. Smith, F. Pellisé, M. Kelli, A. Alanay, E. Acaroğlu, F.J.S. Péres-Grueso, F. Kleinstück, I. Obeid, A. Vila-Casademunt, C.I. Shaffrey Jr., D. Burton, V. Lafage, F. Schwab, C.I. Shaffrey Sr., S. Bess, M. Serra-Burriel; European Spine Study Group, International Spine Study Group // *Spine (Phila Pa 1976)*. 2019. Vol. 44, No 13. P. 915-926. DOI: 10.1097/BRS.0000000000002974.
17. Artificial Intelligence for Adult Spinal Deformity / R.S. Joshi, A.F. Haddad, D. Lau, C.P. Ames // *Neurosurgery*. 2019. Vol. 16, No 4. P. 686-694. DOI: 10.14245/ns.1938414.207.
18. A machine learning approach for predictive models of adverse events following spine surgery / S.S. Han, T.D. Azad, P.A. Suarez, J.K. Ratliff // *Spine J*. 2019. Vol. 19, No 11. P. 1772-1781. DOI: 10.1016/j.spinee.2019.06.018.
19. Prediction of cervical spine injury in young pediatric patients: an optimal trees artificial intelligence approach / D. Bertsimas, P.T. Masiakos, K.S. Mylonas, H. Wiberg // *J. Pediatr. Surg*. 2019. Vol. 54, No 11. P. 2353-2357. DOI: 10.1016/j.jpedsurg.2019.03.007.
20. Deep learning-based preoperative predictive analytics for patient-reported outcomes following lumbar discectomy: feasibility of center-specific modeling / V.E. Staartjes, M.P. de Wispelaere, W.P. Vandertop, M.L. Schröder // *Spine J*. 2019. Vol. 19, No 5. P. 853-861. DOI: 10.1016/j.spinee.2018.11.009.
21. Deep Learning Convolutional Neural Networks for the Automatic Quantification of Muscle Fat Infiltration Following Whiplash Injury / K.A. Weber, A.C. Smith, M. Wasielewski, K. Egtesad, P.A. Upadhyayula, M. Wintermark, T.J. Hastie, T.B. Parrish, S. Mackey, J.M. Elliot // *Sci. Rep*. 2019. Vol. 9, No 1. P. 7973. DOI: 10.1038/s41598-019-44416-8.
22. Ryu S.M., Seo S.W., Lee S.H. Novel prognostication of patients with spinal and pelvic chondrosarcoma using deep survival neural networks // *BMC Med. Inform. Decis. Mak*. 2020. Vol. 20, No 1. P. 3. DOI: 10.1186/s12911-019-1008-4.
23. A Review on the Use of Artificial Intelligence in Spinal Diseases / P. Azimi, T. Yazdani, E.C. Benzel, H.N. Aghaei, S. Azhari, S. Sadeghi, A. Montazeri // *Asian Spine J*. 2020. Vol. 14, No 4. P. 543-571. DOI: 10.31616/asj.2020.0147.
24. Using artificial intelligence (AI) to predict postoperative surgical site infection: A retrospective cohort of 4046 posterior spinal fusions / B.S. Hopkins, A. Mazmudar, C. Driscoll, M. Svet, J. Goergen, M. Kelsten, N.A. Shlobin, K. Kesavabhotla, Z.A. Smith, N.S. Dahdaleh // *Clin. Neurol. Neurosurg*. 2020. Vol. 192. P. 105718. DOI: 10.1016/j.clineuro.2020.105718.
25. Ghogawala Z., Dunbar M., Essa I. Artificial Intelligence for the Treatment of Lumbar Spondylolisthesis // *Neurosurg. Clin. N. Am*. 2019. Vol. 30, No 3. P. 383-389. DOI: 10.1016/j.nec.2019.02.012.
26. Development of machine learning algorithms for prediction of prolonged opioid prescription after surgery for lumbar disc herniation / A.V. Karhade, P.T. Ogink, Q.C.B.S. Thio, T.D. Cha, W.B. Gormley, S.H. Hershman, T.R. Smith, J. Mao, A.J. Schoenfeld, C.M. Bono, J.H. Schwab // *Spine J*. 2019. Vol. 19, No 11. P. 1764-1771. DOI: 10.1016/j.spinee.2019.06.002.
27. Development of an unsupervised machine learning algorithm for the prognostication of walking ability in spinal cord injury patients / Z. DeVries, M. Hoda, C.S. Rivers, A. Maher, E. Wai, D. Moravek, A. Stratton, S. Kingwell, N. Fallah, J. Paquet, P. Phan; RHSCIR Network // *Spine J*. 2020. Vol. 20, No 2. P. 213-224. DOI: 10.1016/j.spinee.2019.09.007.
28. Development of machine learning algorithms for prediction of discharge disposition after elective inpatient surgery for lumbar degenerative disc disorders / A.V. Karhade, P. Ogink, Q. Thio, M. Broekman, T. Cha, W.B. Gormley, S. Hershman, W.C. Peul, C.M. Bono, J.H. Schwab // *Neurosurg. Focus*. 2018. Vol. 45, No 5. P. E6. DOI: 10.3171/2018.8.FOCUS18340.
29. Meyer B., Gempt J. Stupid mistakes // *World Neurosurg*. 2013. Vol. 79, No 3-4. P. 447. DOI: 10.1016/j.wneu.2012.10.044.
30. The prevalence of wrong level surgery among spine surgeons / M.G. Mody, A. Nourbakhsh, D.L. Stahl, M. Gibbs, M. Alfawareh, K.J. Garges // *Spine (Phila Pa 1976)*. 2008. Vol. 33, No 2. P. 194-198. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31816043d1.
31. Makary M.A., Daniel M. Medical error – the third leading cause of death in the US // *BMJ*. 2016. Vol. 353. P. i2139. DOI: 10.1136/bmj.i2139.
32. Artificial intelligence in neurodegenerative disease research: use of IBM Watson to identify additional RNA-binding proteins altered in amyotrophic lateral sclerosis / N. Bakkar, T. Kovalik, I. Lorenzini, S. Spangler, K. Lacoste, K. Sponaugle, P. Ferrante, E. Argentinis, R. Sattler, R. Bowser // *Acta Neuropathol*. 2018. Vol. 135, No 2. P. 227-247. DOI: 10.1007/s00401-017-1785-8.
33. Artificial Intelligence in Cardiology / K.W. Johnson, J. Torres Soto, B.S. Glicksberg, K. Shameer, R. Miotto, M. Ali, E. Ashley, J.T. Dudley // *J. Am. Coll. Cardiol*. 2018. Vol. 71, No 23. P. 2668-2679. DOI: 10.1016/j.jacc.2018.03.521.
34. Kapoor R., Walters S.P., Al-Aswad L.A. The current state of artificial intelligence in ophthalmology // *Surv. Ophthalmol*. 2019. Vol. 64, No 2. P. 233-240. DOI: 10.1016/j.survophthal.2018.09.002.
35. Contreras I., Vehi J. Artificial Intelligence for Diabetes Management and Decision Support: Literature Review // *J. Med. Internet. Res*. 2018. Vol. 20, No 5. P. e10775. DOI: 10.2196/10775.
36. Разработка аппаратно-программных средств контроля параметров качества диффузионно-взвешенных изображений для повышения эффективности диагностики опухолевых образований / К.А. Сергунова, И.Н. Карпов, А.И. Громов, А.К. Морозов, Д.С. Семенов // *Биотехносфера*. 2016. № 5 (47). С. 9-13.
37. Development of Machine Learning Algorithms for Prediction of 30-Day Mortality After Surgery for Spinal Metastasis / A.V. Karhade, Q.C.B.S. Thio, P.T. Ogink, A.A. Shah, C.M. Bono, K.S. Oh, P.J. Saylor, A.J. Schoenfeld, J.H. Shin, M.B. Harris, J.H. Schwab // *Neurosurgery*. 2019. Vol. 85, No 1. P. E83-E91. DOI: 10.1093/neuros/nyy469.
38. Predicting 90-Day and 1-Year Mortality in Spinal Metastatic Disease: Development and Internal Validation / A.V. Karhade, Q.C.B.S. Thio, P.T. Ogink, C.M. Bono, M.L. Ferrone, K.S. Oh, P.J. Saylor, A.J. Schoenfeld, J.H. Shin, M.B. Harris, J.H. Schwab // *Neurosurgery*. 2019. Vol. 85, No 4. P. E671-E681. DOI: 10.1093/neuros/nyz070.

Статья поступила в редакцию 08.07.2020; одобрена после рецензирования 25.09.2021; принята к публикации 19.10.2021.

The article was submitted 08.07.2020; approved after reviewing 25.09.2021; accepted for publication 19.10.2021.

Информация об авторах:

1. Владимир Сергеевич Переверзев – vcpereverz@gmail.com;
2. Аркадий Иванович Казмин – кандидат медицинских наук;
3. Максим Леонидович Сажнев – кандидат медицинских наук;
4. Андрей Андреевич Пантелеев;
5. Сергей Васильевич Колесов – доктор медицинских наук.

Information about the authors:

1. Vladimir S. Pereverzev – M.D., vcpereverz@gmail.com;
2. Arkadii I. Kazmin – Candidate of Medical Sciences;
3. Maxim L. Sazhnev – Candidate of Medical Sciences;
4. Andrei A. Panteleev – M.D.;
5. Sergei V. Kolesov – Doctor of Medical Sciences.