

ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В НЕЙРОХИРУРГИИ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. ЧАСТЬ II: ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

DOI: 10.17691/stm2020.12.6.12
УДК 004.8/.9:616.8–002.1–089.519
Поступила 1.04.2020 г.

© **Г.В. Данилов**, к.м.н., ученый секретарь¹; руководитель лаборатории биомедицинской информатики и искусственного интеллекта¹;
М.А. Шифрин, к.ф.-м.н., научный консультант лаборатории биомедицинской информатики и искусственного интеллекта¹;
К.В. Котик, инженер-физик лаборатории биомедицинской информатики и искусственного интеллекта¹;
Т.А. Ишанкулов, инженер лаборатории биомедицинской информатики и искусственного интеллекта¹;
Ю.Н. Орлов, д.ф.-м.н., зав. отделом вычислительной физики и кинетических уравнений²;
А.С. Куликов, к.м.н., врач-анестезиолог-реаниматолог¹;
А.А. Потапов, д.м.н., профессор, академик РАН, научный руководитель¹

¹Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. академика Н.Н. Бурденко Минздрава России, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16, Москва, 125047;

²Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, пл. Миусская, 4, Москва, 125047

Увеличение ежегодного числа научных публикаций, посвященных применению технологий искусственного интеллекта (ИИ) в нейрохирургии, говорит о новом тренде в клинической нейронауке.

Цель исследования — провести систематический обзор литературы для выделения основных направлений и тенденций применения ИИ в нейрохирургии.

Методы. С помощью поисковой машины PubMed были отобраны 327 оригинальных журнальных статей за период с 1996 г. по июль 2019 г., в которых проанализированы результаты применения технологий ИИ в нейрохирургии. Для каждого раздела нейрохирургии выделены типовые задачи, которые авторы решали с использованием методов ИИ.

Результаты. В рамках каждого из пяти основных разделов нейрохирургии (нейроонкология, функциональная, сосудистая, спинальная нейрохирургия, черепно-мозговая травма) определены группы типичных задач, в решении которых использованы технологии ИИ.

Заключение. Выявлены основные к настоящему времени направления и тенденции применения технологий ИИ в нейрохирургии, информация о которых может быть использована при планировании новых научных проектов.

Ключевые слова: нейрохирургия; искусственный интеллект; тематическое моделирование в нейрохирургии; анализ естественного языка.

Как цитировать: Danilov G.V., Shifrin M.A., Kotik K.V., Ishankulov T.A., Orlov Yu.N., Kulikov A.S., Potapov A.A. Artificial intelligence technologies in neurosurgery: a systematic literature review using topic modeling. Part II: research objectives and perspectives. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2020; 12(6): 111–120, <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.6.12>

English

Artificial Intelligence Technologies in Neurosurgery: a Systematic Literature Review Using Topic Modeling. Part II: Research Objectives and Perspectives

G.V. Danilov, MD, PhD, Scientific Board Secretary¹; Head of the Laboratory of Biomedical Informatics and Artificial Intelligence¹;

M.A. Shifrin, PhD, Scientific Consultant, Laboratory of Biomedical Informatics and Artificial Intelligence¹;

Для контактов: Данилов Глеб Валерьевич, e-mail: glebda@yandex.ru

K.V. Kotik, Physics Engineer, Laboratory of Biomedical Informatics and Artificial Intelligence¹;
T.A. Ishankulov, Engineer, Laboratory of Biomedical Informatics and Artificial Intelligence¹;
Yu.N. Orlov, DSc, Head of the Department of Computational Physics and Kinetic Equations²;
A.S. Kulikov, MD, PhD, Staff Anesthesiologist¹;
A.A. Potapov, MD, DSc, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences,
 Chief Scientific Supervisor¹

¹N.N. Burdenko National Medical Research Center for Neurosurgery, Ministry of Health of the Russian Federation,
 16, 4th Tverskaya-Yamskaya St., Moscow, 125047, Russia;

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, 4 Miuskaya Square, Moscow,
 125047, Russia

The current increase in the number of publications on the use of artificial intelligence (AI) technologies in neurosurgery indicates a new trend in clinical neuroscience.

The aim of the study was to conduct a systematic literature review to highlight the main directions and trends in the use of AI in neurosurgery.

Methods. Using the PubMed search engine, 327 original journal articles published from 1996 to July 2019 and related to the use of AI technologies in neurosurgery, were selected. The typical issues addressed by using AI were identified for each area of neurosurgery.

Results. The typical AI applications within each of the five main areas of neurosurgery (neuro-oncology, functional, vascular, spinal neurosurgery, and traumatic brain injury) were defined.

Conclusion. The article highlights the main areas and trends in the up-to-date AI research in neurosurgery, which might be helpful in planning new scientific projects.

Key words: neurosurgery; artificial intelligence; topic modeling in neurosurgery; natural language processing.

Введение

В первой части данного систематического обзора литературы (см. «Современные технологии в медицине», том 12, №5, с. 106–113) с помощью методов тематического моделирования были определены основные темы публикаций, посвященных использованию технологий искусственного интеллекта (ИИ) в пяти основных разделах нейрохирургии: нейроонкологии, функциональной, сосудистой, спинальной нейрохирургии, черепно-мозговой травме. Вторая часть обзора посвящена выделению и обсуждению основных задач, в рамках которых авторы применяли и оценивали методы ИИ.

Материалы и методы

Обзор выполнен с использованием рекомендаций PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [1].

В анализ были включены статьи в журналах и материалах международных конференций, соответствующие следующим критериям:

публикация является оригинальной исследовательской статьей;

публикация посвящена патологии и/или методам лечения, непосредственно имеющим отношение к нейрохирургии;

в работе анализируется использование технологии ИИ в решении клинической задачи диагностики, лечения, прогноза, реабилитации или профилактики патологии нервной системы;

нейрохирургия является потенциальной или факти-

ческой областью применения анализируемой в работе технологии ИИ.

Поиск литературы для систематического обзора выполнен с помощью поисковой машины системы PubMed Национальной медицинской библиотеки США (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>). Запрос для поиска был сформулирован так, чтобы в поисковую выдачу попадали все документы, для которых в любых полях базы данных одновременно находились термины «neurosurgery» или «neurosurgical procedures» и термины, обозначающие отдельные технологии ИИ (в том числе анализ больших массивов данных, машинное обучение). Точная и полная формулировка запроса к поисковой машине PubMed приведена ниже:

("neurosurgical procedures"[MeSH Terms] OR ("neurosurgical"[All Fields] AND "procedures"[All Fields]) OR "neurosurgical procedures"[All Fields] OR "neurosurgery"[All Fields] OR "neurosurgery"[MeSH Terms]) AND ("artificial intelligence"[All Fields] OR "machine learning"[All Fields] OR "natural language processing"[All Fields] OR NLP[All Fields] OR "text mining"[All Fields] OR "fuzzy logic"[All Fields] OR "data mining"[All Fields] OR "big data"[All Fields] OR "topic model"[All Fields]).

Результаты поисковой выдачи просматривали, отбирая оригинальные статьи, соответствующие критериям включения в систематический обзор. Отобранные статьи классифицировали в соответствии с областью нейрохирургии, в которой были проведены исследования, а также экспертным способом формировали предварительные темы работ и определяли их число. Процесс отбора и технические средства, использованные для выполнения систематиче-

ского обзора литературы, более подробно описаны в первой его части.

Результаты

В соответствии с критериями включения были отобраны 327 работ, опубликованных в период с 1996 г. по июль 2019 г. Полный список из 327 проанализированных публикаций представлен в Приложении (https://drive.google.com/file/d/11SrFQzyHXJ4vvmH_jJAQuA5QZ9kdqlhM/view?usp=sharing). Рассмотрим варианты использования технологий ИИ в каждом разделе нейрохирургии более подробно. Приведем ссылки лишь на отдельные публикации, хорошо иллюстрирующие задачи исследования.

Применение искусственного интеллекта в нейроонкологии (133 публикации). Примерно 41% выделенных работ посвящен возможностям использования технологий ИИ в нейроонкологии (см. Приложение). Основными источниками данных для этих публикаций служили медицинские изображения (данные магнитно-резонансной томографии, компьютерной томографии, позитронно-эмиссионной томографии, ультразвуковых исследований, оптической когерентной томографии, конфокальной лазерной микроскопии); результаты геномного секвенирования, гистологических исследований.

Основными задачами, решаемыми в нейрохирургической онкологии с помощью технологий ИИ, являлись следующие:

- сегментация и волюметрия структур мозга [2, 3];
- неинвазивная тканевая и молекулярно-генетическая дифференциальная диагностика [4–7];
- прогнозирование осложнений и исходов лечения [8, 9].

К оригинальным вариантам применения ИИ в нейроонкологии относится анализ тенденций развития исследований в нейроонкологии по данным научных публикаций. Интересной задачей, решаемой в данном разделе, является прогнозирование деформации мозга (*англ.* brain shift) во время операции. Решение этой задачи имеет важное значение для развития технологий интраоперационной нейронавигации.

Применение искусственного интеллекта в функциональной нейрохирургии (62 публикации). Приблизительно 19% работ по использованию ИИ в нейрохирургии посвящены вопросам функциональной нейрохирургии, в том числе хирургии эпилепсии (см. Приложение). Основными источниками данных в таких исследованиях были результаты электроэнцефалографии и электрокортикографии, магнитоэнцефалографии; медицинские изображения (магнитно-резонансная томография, в том числе функциональная, с изучением сетей покоя, позитронно-эмиссионная томография, однофотонная эмиссионная томография); данные глубокой стимуляции мозга, видеомониторинга состояния пациента; тексты в медицинских информационных системах,

биохимические и генетические анализы, показания с носимых устройств.

В качестве типичных задач, решаемых исследователями в данных работах, укажем:

- диагностику эпилепсии, иктальной и интериктальной активности, предвестников приступов [10–12];
- функциональную трактографию [13];
- поиск маркеров эпилептогенеза [14];
- отбор кандидатов на хирургическое лечение эпилепсии [15];
- прогнозирование исходов лечения эпилепсии [16];
- диагностику (в том числе дифференциальную) болезни Паркинсона [17];
- изучение функциональных компенсаторных механизмов у пациентов с болезнью Паркинсона [18];
- исследование двигательных расстройств при болезни Паркинсона [19];
- электрофизиологическую идентификацию постурального тремора и произвольных движений при эссенциальном треморе [20];
- детекцию мишеней, планирование и модуляцию глубокой стимуляции мозга [21];
- прогнозирование побочных явлений операции [22];
- прогнозирование исходов микроваскулярной декомпрессии при гемифациальном спазме [23];
- поиск электрофизиологических коррелятов нейропатической боли [24];
- диагностику нейропсихиатрических расстройств [25];
- исследование механизмов эпизодической и семантической памяти [26];
- определение доминантности полушария по речи [27];
- идентификацию патологического очага и сегментацию структур мозга [28].

Для данного раздела исследований в нейрохирургии характерно большее разнообразие задач по сравнению с областью нейроонкологии. Основными классами исследуемой патологии явились эпилепсия и расстройства движений; доминирующим источником данных — электрическая активность головного мозга, зарегистрированная не только от кожных покровов головы, но и непосредственно от коры и глубоких структур мозга, включая активность отдельных нейронных ансамблей. С использованием микроэлектродов, установленных интракраниально, исследователи получали прямой доступ к анализу электрической активности головного мозга и для фундаментальных физиологических исследований, в частности для изучения механизмов памяти и речи.

Применение искусственного интеллекта в сосудистой нейрохирургии (44 работы). Исследования в области сосудистой хирургии составили 14% всех работ в нейрохирургии с применением технологий ИИ (см. Приложение). Наиболее частыми источниками данных в этих исследованиях являлись медицинские изображения (компьютерная томография, в том числе в режиме ангиографии, магнитно-

резонансная томография, цифровая субтракционная ангиография, рентгеновские изображения); данные медицинских информационных систем, систем прикроватного мониторинга, электроэнцефалографии, стереолитографии; анализы крови; социальные и демографические данные. К нестандартным источникам данных в этой области исследований можно отнести сведения о состоянии загрязнения окружающей среды.

Ключевыми задачами вышеуказанных работ являлись:

- идентификация пациентов с аневризмами [29];
- диагностика неразрывавшихся аневризм [30];
- оценка риска и факторов риска разрыва аневризм (в том числе маленьких) и спонтанного внутричерепного кровоизлияния [31];
- определение риска расстройств сердечной деятельности после аневризматического субарахноидального кровоизлияния [32];
- прогнозирование исходов разрыва аневризм [33];
- прогнозирование ишемии после аневризматического субарахноидального кровоизлияния [34];
- оценка степени тяжести интракраниального стеноза сосудов [35];
- диагностика атеросклеротических бляшек [36];
- прогнозирование стойкого снижения артериального давления после каротидного стентирования и ангиопластики [37];
- оценка риска инсульта после стентирования сонной артерии [38];
- прогнозирование перфузионного дефицита [39];
- сегментирование кровеносных сосудов, артериовенозной мальформации [40];
- прогнозирование неблагоприятных событий и исходов разных видов лечения артериовенозных мальформаций [41];
- определение, классификация и сегментация внутричерепного/внутричерепного кровоизлияния [42];
- установление генеза внутричерепных гематом [43];
- прогнозирование увеличения объема гипертензивной внутричерепной гематомы [44];
- оценка риска внутричерепного кровоизлияния [42];
- прогнозирование функциональных исходов внутричерепного кровоизлияния [45];
- прогнозирование ухудшения сознания при геморрагическом инсульте [46].

Несмотря на существенно меньший объем публикаций по сравнению с областью нейроонкологии, в сосудистой нейрохирургии ИИ применяли в задачах довольно широкого спектра. Большую часть таких задач можно свести к оценке характеристик патологического сосудистого образования, к прогнозу осложнений и исходов лечения.

Применение искусственного интеллекта в спинальной нейрохирургии (29 публикаций). Использованию ИИ в спинальной нейрохирургии посвящены 8% работ (см. Приложение). Главными источниками данных в этой области служили медицинские изображения (магнитно-резонансная томо-

графия, компьютерная томография, рентгенограммы, ультразвуковые изображения); данные датчиков движения конечностей. Оригинальными источниками данных стали видеозаписи движений хирурга, а также научные статьи из Национальной медицинской библиотеки США. В качестве основных задач, решаемых в данной области исследований, можно назвать:

- прогнозирование осложнений [47];
- прогнозирование исходов лечения [48];
- прогнозирование вариантов выписки из стационара [49];
- трансформацию изображений в разные модальности [50];
- сегментацию костной ткани, позвоночника [51];
- кластеризацию пациентов и категорий вмешательств при деформациях позвоночника [52];
- оценку моторной функции у пациентов с патологией шейного отдела позвоночника, со стенозом позвоночного канала на поясничном уровне [53, 54];
- оценку опущения стопы при поясничной радикулопатии [55];
- диагностику люмбалгии по визуальным признакам [56];
- прогнозирование долгосрочного приема опиоидов после операций [57];
- прогноз развития остеопороза [58].

Оригинальными исследованиями в этой категории явились работы по прогнозированию показателей внутричерепного давления у пациентов во время спинальной операции и предсказанию последовательности действий хирурга во время вмешательства [59, 60].

Применение искусственного интеллекта в области черепно-мозговой травмы (26 публикаций). В 8% исследований ИИ применяли в решении задач нейротравматологии (см. Приложение). Источниками данных для этих работ являлись медицинские изображения (компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, терагерцевая нейровизуализация), электроэнцефалография, данные устройств мониторинга состояния пациента (включая внутричерепное давление), клинические данные, данные мониторинга глазодвижений, генетические исследования.

При относительно небольшом пуле работ по применению технологий ИИ черепно-мозговая травма является областью с большим разнообразием источников данных и при этом — с очень сложными проблемами прогнозирования. Основными задачами проанализированных исследований являлись:

- оценка тяжести черепно-мозговой травмы [61];
- диагностика нарушений сознания [62];
- количественная оценка внутричерепных изменений [63];
- поиск биомаркеров черепно-мозговой травмы [64];
- прогнозирование вторичных повреждений, классификация неблагоприятных событий и осложнений [65];
- прогнозирование исходов, поиск прогностических факторов [66];

оценка показателей ауторегуляции мозгового кровотока [67];

неинвазивная оценка внутричерепного давления [68].

Прочие публикации (разные и смешанные темы). Около 10% работ по применению методов ИИ в нейрохирургии посвящены преимущественно общим задачам, решаемым для нескольких/многих видов нейрохирургической патологии или не имеющим специфичности для какой-либо патологии. В таких работах использовали данные медицинских изображений, электрофизиологические данные и прочие описанные выше источники. Примером являются исследования в области интенсивной терапии (например, анализ инфекционных осложнений у пациентов отделения нейрореанимации).

К оригинальным источникам данных для исследований в этой области относятся фотографии лиц пациентов, данные смартфонов (для определения коррелятов неврологического статуса) и тексты научных публикаций.

Технологии искусственного интеллекта, использованные в исследованиях. В рассмотренных работах были применены как традиционные для задач классификации и прогнозирования технологии (регрессионные модели, метод опорных векторов, деревья решений, наивный байесовский классификатор), так и методы, получившие в последнее время активное развитие (искусственные нейронные сети, анализ текстов на естественном языке). Таким образом, в проведенных исследованиях был задействован практически весь спектр современных технологий ИИ.

Обсуждение

В результате проведенного анализа литературы стало очевидным, что основными источниками данных для использования технологий ИИ в области нейрохирургии служат нейровизуализация, секвенирование генома, инвазивные и неинвазивные биосенсоры, данные медицинских информационных систем (в том числе неструктурированные). При этом анализу медицинских текстов (научной литературы и медицинских записей) с помощью ИИ в нейрохирургии уделено существенно меньше внимания.

Современные технологии анализа текстов позволяют исследовать содержание медицинских записей, выделяя значимую информацию для формулирования и проверки научных гипотез. С помощью технологий ИИ можно не только извлекать данные из медицинских текстов, но и строить диагностические и прогностические модели на их основе [69]. В качестве источника для подобного рода анализа может служить архив электронных медицинских записей за большой период времени. Эти записи в настоящий момент используют с известными ограничениями в ретроспективных исследованиях, хотя они являются латентными информационными недрами медицины [70]. Примеры решения исследова-

тельских задач с помощью технологий анализа естественного языка (*англ.* natural language processing, NLP) в нейрохирургии — работы по прогнозированию внутрибольничных инфекций после нейрохирургических вмешательств [71, 72]. В работе К.В. Cohen и соавт. [15] показано, что средства обработки естественного языка и методы машинного обучения могут способствовать улучшению отбора кандидатов для хирургического лечения эпилепсии и сокращению времени определения показаний к этому лечению. Исследования, обобщающие факторы риска развития нейрохирургической патологии и прогнозы вариантов ее течения с помощью методов анализа медицинских текстов, в настоящий момент являются единичными.

В то же время важным источником больших данных для исследовательских задач являются электронные медицинские библиотеки. В настоящий момент обобщение и критическая оценка результатов исследований в соответствии с канонами доказательной медицины проводятся экспертами с помощью систематических обзоров и метаанализов [73]. Такие обобщающие исследования, как правило, требуют больших трудозатрат и временного ресурса, дают максимально обоснованный ответ, однако на очень узкий круг вопросов. В то же время в научной литературе менее «высокого качества» с позиций доказательной медицины содержится большое количество информации, которая не подвергается критической оценке традиционными методами доказательной медицины. В хирургических областях медицины, включая нейрохирургию, количество исследований с высоким уровнем достоверности доказательств оказывается существенно меньшим, чем в терапевтических [73, 74]. Именно поэтому аналитические инструменты, способные преодолевать ограничения систематических обзоров и наиболее полно использовать информацию из тысяч публикаций, в нейрохирургии приобретают особую значимость. В последние годы появились работы, в которых научная литература по нейрохирургии анализируется и обобщается с помощью ИИ [75–77]. Такие технологии (тематическое моделирование) применены и в настоящем обзоре.

На сегодняшний день распространенным ограничением работ, проводимых в нейрохирургии с использованием ИИ, является относительно небольшой объем выборок (десятки, сотни, реже — тысячи наблюдений) по сравнению с большими данными, на которые нацелено машинное обучение в других отраслях науки и производства. Недостаточное количество данных ставит под сомнение масштабируемость решений, разрабатываемых с помощью ИИ, даже несмотря на хорошие показатели в единичных исследованиях. Именно поэтому продуктивные научные проекты с использованием подобных методов в медицине оправданы для организаторов исследований, владеющих ресурсом больших данных.

По нашему мнению, при планировании исследований с использованием технологий ИИ важно

придерживаться принципов доказательной медицины, которые обеспечивают научную обоснованность полученных результатов и, следовательно, увеличивают их пользу для пациентов. Принципиальную значимость, безусловно, имеет этап планирования, на котором выбирается методология, адекватная для достижения поставленной цели при минимизации систематических ошибок. В то же время технологии анализа большого объема данных могут до известной степени компенсировать методические ограничения исследований в нейрохирургии (например, невозможность во многих случаях использовать рандомизацию и двойное маскирование).

Предназначение и перспективы искусственного интеллекта в нейрохирургии. При широком спектре задач использования ИИ, продемонстрированном в настоящем обзоре, применение данных технологий можно свести к двум основным направлениям — исследовательскому и прикладному клиническому.

В исследовательском направлении потенциал ИИ заключается в возможности извлечения большего количества полезной информации и знаний при максимальном и эффективном использовании имеющихся данных и при значительном сокращении времени на проведение исследований. Такой подход преодолевает ограничения классических исследовательских методов математической статистики, тестирующей гипотезы на несравнимо меньшем количестве данных.

В прикладном направлении ИИ, вероятно, имеет значительный потенциал для решения задач автоматизации медицинской деятельности, т.е. ускорения, упрощения и повышения надежности диагностики заболеваний, принятия клинических решений и прогнозирования возможных осложнений и исходов медицинских вмешательств. Успешное развитие такого направления ИИ должно принести экономический эффект за счет сокращения человеческих трудозатрат и времени принятия эффективных решений.

Понимание перспективности технологий ИИ обуславливает необходимость развития и широкой апробации этих методов в научной и практической медицинской деятельности.

Интерпретация термина «искусственный интеллект» в контексте медицинских задач. Под термином «искусственный интеллект» можно интуитивно (однако в настоящее время ошибочно) понимать «машину, способную мыслить», а в контексте медицины — буквально «робота-врача». Нейронаука пока не достигла понимания всех основ человеческого интеллекта, а технологии ИИ не приблизились к созданию «искусственного мозга». В данный момент методы, объединенные понятием «искусственный интеллект», решают вполне традиционные, прагматические задачи, но с новыми возможностями и потенциалом. Результаты вычислений с помощью ИИ, как и результаты классического статистического анализа, в медицине интерпретирует врач. Несмотря на сходство ра-

боты математических алгоритмов с интеллектуальной деятельностью человека, эти методы пока не могут имитировать сознание, совесть, рефлексивность и другие способности человеческого мозга, которые позволяют врачу принимать взвешенные решения и нести за них ответственность. Подобно роботизированным навигационным системам, микроскопам и линейным ускорителям, технологии ИИ являются новым инструментом в арсенале врача, имеют потенциал стать рутинными, но сегодня еще не могут рассматриваться как замена клиницисту.

Ограничения работы. В настоящую работу включено большое число публикаций для широкого охвата тенденций развития ИИ в области нейрохирургии без тестирования специальных гипотез об эффективности, безопасности или экономической целесообразности применения отдельных технологий в каких-то определенных условиях. Таким образом, авторы ограничиваются констатацией фактов применения методов ИИ в разных задачах без научной оценки качества их работы.

Заключение

Исследования с применением технологий искусственного интеллекта к настоящему времени проведены преимущественно в пяти крупных разделах нейрохирургии: нейроонкологии, функциональной, сосудистой и спинальной нейрохирургии и в разделе черепно-мозговой травмы. Основными источниками данных в таких исследованиях являлись нейровизуализация, секвенирование генома, биосенсоры, записи медицинских информационных систем. Применение искусственного интеллекта становится мировым научным трендом в нейрохирургии, при этом все большую актуальность приобретает научно обоснованная оценка эффективности, безопасности и применимости данных технологий в клинике.

Вклад авторов: Г.В. Данилов — идея, написание обзора, протокол исследования, программный доступ к PubMed средствами R, отбор статей, тематическое моделирование с использованием алгоритма LDA; А.А. Потапов — рецензирование и корректировка статьи с позиций нейрохирурга; М.А. Шифрин — рецензирование и корректировка статьи с позиций специалиста по медицинской информатике; К.В. Котик — тематическое моделирование с использованием алгоритма ARTM; Ю.Н. Орлов — рецензирование и корректировка статьи с позиций специалиста по искусственному интеллекту; Т.А. Ишанкулов — программный доступ к PubMed средствами Python; А.С. Куликов — рецензирование и корректировка статьи с позиций нейроанестезиолога.

Финансирование исследования. Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований 19-29-01174.

Конфликт интересов отсутствует.

Литература/References

1. Moher D., Shamseer L., Clarke M., Ghersi D., Liberati A., Petticrew M., Shekelle P., Stewart L.A.; PRISMA-P Group. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Syst Rev* 2015; 4: 1, <https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1>.
2. Charron O., Lallement A., Jarnet D., Noblet V., Clavier J.B., Meyer P. Automatic detection and segmentation of brain metastases on multimodal MR images with a deep convolutional neural network. *Comput Biol Med* 2018; 95: 43–54, <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2018.02.004>.
3. Chang K., Beers A.L., Bai H.X., Brown J.M., Ly K.I., Li X., Senders J.T., Kavouridis V.K., Boaro A., Su C., Bi W.L., Rapalino O., Liao W., Shen Q., Zhou H., Xiao B., Wang Y., Zhang P.J., Pinho M.C., Wen P.Y., Batchelor T.T., Boxerman J.L., Arnaout O., Rosen B.R., Gerstner E.R., Yang L., Huang R.Y., Kalpathy-Cramer J. Automatic assessment of glioma burden: a deep learning algorithm for fully automated volumetric and bi-dimensional measurement. *Neuro Oncol* 2019; 21(11): 1412–1422, <https://doi.org/10.1093/neuonc/noz106>.
4. Banzato T., Causin F., Della Puppa A., Cester G., Mazza L., Zotti A. Accuracy of deep learning to differentiate the histopathological grading of meningiomas on MR images: a preliminary study. *J Magn Reson Imaging* 2019; 50(4): 1152–1159, <https://doi.org/10.1002/jmri.26723>.
5. Chen X., Tong Y., Shi Z., Chen H., Yang Z., Wang Y., Chen L., Yu J. Noninvasive molecular diagnosis of craniopharyngioma with MRI-based radiomics approach. *BMC Neurol* 2019; 19(1): 6, <https://doi.org/10.1186/s12883-018-1216-z>.
6. Zhou H., Chang K., Bai H.X., Xiao B., Su C., Bi W.L., Zhang P.J., Senders J.T., Vallières M., Kavouridis V.K., Boaro A., Arnaout O., Yang L., Huang R.Y. Machine learning reveals multimodal MRI patterns predictive of isocitrate dehydrogenase and 1p/19q status in diffuse low- and high-grade gliomas. *J Neurooncol* 2019; 142(2): 299–307, <https://doi.org/10.1007/s11060-019-03096-0>.
7. Citak-Er F., Firat Z., Kovanlikaya I., Ture U., Ozturk-Isik E. Machine-learning in grading of gliomas based on multi-parametric magnetic resonance imaging at 3T. *Comput Biol Med* 2018; 99: 154–160, <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2018.06.009>.
8. Nie D., Lu J., Zhang H., Adeli E., Wang J., Yu Z., Liu L., Wang Q., Wu J., Shen D. Multi-channel 3D deep feature learning for survival time prediction of brain tumor patients using multi-modal neuroimages. *Sci Rep* 2019; 9(1): 1103, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37387-9>.
9. van Niftrik C.H.B., van der Wouden F., Staartjes V.E., Fierstra J., Stienen M.N., Akeret K., Sebök M., Fedele T., Sarnthein J., Bozinov O., Kraysenbühl N., Regli L., Serra C. Machine learning algorithm identifies patients at high risk for early complications after intracranial tumor surgery: registry-based cohort study. *Neurosurgery* 2019; 85(4): E756–E764, <https://doi.org/10.1093/neuros/nyz145>.
10. Park S.C., Chung C.K. Postoperative seizure outcome-guided machine learning for interictal electrocorticography in neocortical epilepsy. *J Neurophysiol* 2018; 119(6): 2265–2275, <https://doi.org/10.1152/jn.00225.2017>.
11. Verhoeven T., Coito A., Plomp G., Thomschewski A., Pittau F., Trinka E., Wiest R., Schaller K., Michel C., Seeck M., Dambre J., Vulliemoz S., van Mierlo P. Automated diagnosis of temporal lobe epilepsy in the absence of interictal spikes. *NeuroImage Clin* 2018; 17: 10–15, <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2017.09.021>.
12. Emami A., Kunii N., Matsuo T., Shinozaki T., Kawai K., Takahashi H. Seizure detection by convolutional neural network-based analysis of scalp electroencephalography plot images. *NeuroImage Clin* 2019; 22: 101684, <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2019.101684>.
13. Trebaul L., Deman P., Tuyisenge V., Jedynak M., Hugues E., Rudrauf D., Bhattacharjee M., Tadel F., Chanteloup-Foret B., Saubat C., Reyes Mejia G.C., Adam C., Nica A., Pail M., Dubeau F., Rheims S., Trébuchon A., Wang H., Liu S., Blauwblomme T., Garcés M., De Palma L., Valentin A., Metsähonkala E.L., Petrescu A.M., Landré E., Szurhaj W., Hirsch E., Valton L., Rocamora R., Schulze-Bonhage A., Mindruta I., Francione S., Maillard L., Taussig D., Kahane P., David O. Probabilistic functional tractography of the human cortex revisited. *NeuroImage* 2018; 181: 414–429, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.07.039>.
14. Duncan D., Barisano G., Cabeen R., Seppehrband F., Garner R., Braimah A., Vespa P., Pitkänen A., Law M., Toga A.W. Analytic tools for post-traumatic epileptogenesis biomarker search in multimodal dataset of an animal model and human patients. *Front Neuroinform* 2018; 12: 86, <https://doi.org/10.3389/fninf.2018.00086>.
15. Cohen K.B., Glass B., Greiner H.M., Holland-Bouley K., Standridge S., Arya R., Faist R., Morita D., Mangano F., Connolly B., Glauser T., Pestian J. Methodological issues in predicting pediatric epilepsy surgery candidates through natural language processing and machine learning. *Biomed Inform Insights* 2016; 8: 11–18, <https://doi.org/10.4137/bii.s38308>.
16. Taylor P.N., Sinha N., Wang Y., Vos S.B., de Tisi J., Misericocchi A., McEvoy A.W., Winston G.P., Duncan J.S. The impact of epilepsy surgery on the structural connectome and its relation to outcome. *NeuroImage Clin* 2018; 18: 202–214, <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2018.01.028>.
17. Du G., Lewis M.M., Kanekar S., Sterling N.W., He L., Kong L., Li R., Huang X. Combined diffusion tensor imaging and apparent transverse relaxation rate differentiate Parkinson disease and atypical parkinsonism. *AJNR Am J Neuroradiol* 2017; 38(5): 966–972, <https://doi.org/10.3174/ajnr.A5136>.
18. Poston K.L., YorkWilliams S., Zhang K., Cai W., Everling D., Tayim F.M., Llanes S., Menon V. Compensatory neural mechanisms in cognitively unimpaired Parkinson disease. *Ann Neurol* 2016; 79(3): 448–463, <https://doi.org/10.1002/ana.24585>.
19. Kuhner A., Schubert T., Cenciarini M., Wiesmeier I.K., Coenen V.A., Burgard W., Weiller C., Maurer C. Correlations between motor symptoms across different motor tasks, quantified via random forest feature classification in Parkinson's disease. *Front Neurol* 2017; 8: 607, <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00607>.
20. Tan H., Debarros J., He S., Pogosyan A., Aziz T.Z., Huang Y., Wang S., Timmermann L., Visser-Vandewalle V., Pedrosa D.J., Green A.L., Brown P. Decoding voluntary movements and postural tremor based on thalamic LFPs as a basis for closed-loop stimulation for essential tremor. *Brain Stimul* 2019; 12(4): 858–867, <https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.02.011>.
21. Rajpurohit V., Danish S.F., Hargreaves E.L., Wong S. Optimizing computational feature sets for subthalamic nucleus localization in DBS surgery with feature selection. *Clin*

- Neurophysiol* 2015; 126(5): 975–982, <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2014.05.039>.
22. Baumgarten C., Zhao Y., Sauleau P., Malrain C., Jannin P., Haegelen C. Image-guided preoperative prediction of pyramidal tract side effect in deep brain stimulation: proof of concept and application to the pyramidal tract side effect induced by pallidal stimulation. *J Med Imaging (Bellingham)* 2016; 3(2): 025001, <https://doi.org/10.1117/1.jmi.3.2.025001>.
23. Lee J.A., Kim K.H., Kong D.S., Lee S., Park S.K., Park K. Algorithm to predict the outcome of microvascular decompression for hemifacial spasm: a data-mining analysis using a decision tree. *World Neurosurg* 2019; 125: e797–e806, <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.01.172>.
24. North R.Y., Li Y., Ray P., Rhines L.D., Tatsui C.E., Rao G., Johansson C.A., Zhang H., Kim Y.H., Zhang B., Dussor G., Kim T.H., Price T.J., Dougherty P.M. Electrophysiological and transcriptomic correlates of neuropathic pain in human dorsal root ganglion neurons. *Brain* 2019; 142(5): 1215–1226, <https://doi.org/10.1093/brain/awz063>.
25. O'Halloran R., Kopell B.H., Sprooten E., Goodman W.K., Frangou S. Multimodal neuroimaging-informed clinical applications in neuropsychiatric disorders. *Front Psychiatry* 2016; 7: 63, <https://doi.org/10.3389/fpsy.2016.00063>.
26. Weidemann C.T., Kragel J.E., Lega B.C., Worrell G.A., Sperling M.R., Sharan A.D., Jobst B.C., Khadjevand F., Davis K.A., Wanda P.A., Kadel A., Rizzuto D.S., Kahana M.J. Neural activity reveals interactions between episodic and semantic memory systems during retrieval. *J Exp Psychol Gen* 2019; 148(1): 1–12, <https://doi.org/10.1037/xge0000480>.
27. Gazit T., Andelman F., Glikmann-Johnston Y., Gonen T., Solski A., Shapira-Lichter I., Ovadia M., Kipervasser S., Neufeld M.Y., Fried I., Hender T., Perry D. Probabilistic machine learning for the evaluation of presurgical language dominance. *J Neurosurg* 2016; 125(2): 481–493, <https://doi.org/10.3171/2015.7.jns142568>.
28. Yang C., Wang Q., Wu W., Xue Y., Lu W., Wu S. Thalamic segmentation based on improved fuzzy connectedness in structural MRI. *Comput Biol Med* 2015; 66: 222–234, <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2015.09.002>.
29. Park A., Chute C., Rajpurkar P., Lou J., Ball R.L., Shpanskaya K., Jabarkheel R., Kim L.H., McKenna E., Tseng J., Ni J., Wishah F., Wittber F., Hong D.S., Wilson T.J., Halabi S., Basu S., Patel B.N., Lungren M.P., Ng A.Y., Yeom K.W. Deep learning-assisted diagnosis of cerebral aneurysms using the HeadXNet model. *JAMA Netw Open* 2019; 2(6): e195600, <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2019.5600>.
30. Tutino V.M., Poppenberg K.E., Li L., Shallwani H., Jiang K., Jarvis J.N., Sun Y., Snyder K.V., Levy E.I., Siddiqui A.H., Kolega J., Meng H. Biomarkers from circulating neutrophil transcriptomes have potential to detect unruptured intracranial aneurysms. *J Transl Med* 2018; 16(1): 373, <https://doi.org/10.1186/s12967-018-1749-3>.
31. Liu J., Chen Y., Lan L., Lin B., Chen W., Wang M., Li R., Yang Y., Zhao B., Hu Z., Duan Y. Prediction of rupture risk in anterior communicating artery aneurysms with a feed-forward artificial neural network. *Eur Radiol* 2018; 28(8): 3268–3275, <https://doi.org/10.1007/s00330-017-5300-3>.
32. Megjhani M., Kaffashi F., Terilli K., Alkhachroum A., Esmaeili B., Doyle K.W., Murthy S., Velazquez A.G., Connolly E.S. Jr., Roh D.J., Agarwal S., Loparo K.A., Claassen J., Boehme A., Park S. Heart rate variability as a biomarker of neurocardiogenic injury after subarachnoid hemorrhage. *Neurocrit Care* 2020; 32(1): 162–171, <https://doi.org/10.1007/s12028-019-00734-3>.
33. Rubbert C., Patil K.R., Beseoglu K., Mathys C., May R., Kaschner M.G., Sigl B., Teichert N.A., Boos J., Turowski B., Caspers J. Prediction of outcome after aneurysmal subarachnoid haemorrhage using data from patient admission. *Eur Radiol* 2018; 28(12): 4949–4958, <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5505-0>.
34. Park S., Megjhani M., Frey H.P., Grave E., Wiggins C., Terilli K.L., Roh D.J., Velazquez A., Agarwal S., Connolly E.S. Jr., Schmidt J.M., Claassen J., Elhadad N. Predicting delayed cerebral ischemia after subarachnoid hemorrhage using physiological time series data. *J Clin Monit Comput* 2019; 33(1): 95–105, <https://doi.org/10.1007/s10877-018-0132-5>.
35. Waddle S.L., Juttukonda M.R., Lants S.K., Davis L.T., Chitale R., Fusco M.R., Jordan L.C., Donahue M.J. Classifying intracranial stenosis disease severity from functional MRI data using machine learning. *J Cereb Blood Flow Metab* 2019; 40(4): 705–719, <https://doi.org/10.1177/0271678X19848098>.
36. Chihara H., Oishi N., Ishii A., Munemitsu T., Arai D., Ikeda H., Miyamoto S. In vivo detection of atherosclerotic plaque using non-contact and label-free near-infrared hyperspectral imaging. *Atherosclerosis* 2016; 250: 106–113, <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2016.04.029>.
37. Jeon J.P., Kim C., Oh B.D., Kim S.J., Kim Y.S. Prediction of persistent hemodynamic depression after carotid angioplasty and stenting using artificial neural network model. *Clin Neurol Neurosurg* 2018; 164: 127–131, <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2017.12.005>.
38. Ichinose N., Hama S., Tsuji T., Soh Z., Hayashi H., Kiura Y., Sakamoto S., Okazaki T., Ishii D., Shinagawa K., Kurisu K. Predicting ischemic stroke after carotid artery stenting based on proximal calcification and the jellyfish sign. *J Neurosurg* 2018; 128(5): 1280–1288, <https://doi.org/10.3171/2017.1.jns162379>.
39. Vargas J., Spiotta A., Chatterjee A.R. Initial experiences with artificial neural networks in the detection of computed tomography perfusion deficits. *World Neurosurg* 2018; 124: e10–e16, <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.10.084>.
40. Livne M., Rieger J., Aydin O.U., Taha A.A., Akay E.M., Kossen T., Sobesky J., Kelleher J.D., Hildebrand K., Frey D., Madai V.I. A U-net deep learning framework for high performance vessel segmentation in patients with cerebrovascular disease. *Front Neurosci* 2019; 13: 97, <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00097>.
41. Asadi H., Kok H.K., Looby S., Brennan P., O'Hare A., Thornton J. Outcomes and complications after endovascular treatment of brain arteriovenous malformations: a prognostication attempt using artificial intelligence. *World Neurosurg* 2016; 96: 562–569.e1, <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2016.09.086>.
42. Scherer M., Cordes J., Younsi A., Sahin Y.A., Götz M., Möhlenbruch M., Stock C., Bösel J., Unterberg A., Maier-Hein K., Orakcioglu B. Development and validation of an automatic segmentation algorithm for quantification of intracerebral hemorrhage. *Stroke* 2016; 47(11): 2776–2782, <https://doi.org/10.1161/strokeaha.116.013779>.
43. Zhang Y., Zhang B., Liang F., Liang S., Zhang Y., Yan P., Ma C., Liu A., Guo F., Jiang C. Radiomics features on non-contrast-enhanced CT scan can precisely classify AVM-related hematomas from other spontaneous intraparenchymal

hematoma types. *Eur Radiol* 2019; 29(4): 2157–2165, <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5747-x>.

44. Ma C., Zhang Y., Niyazi T., Wei J., Guocai G., Liu J., Liang S., Liang F., Yan P., Wang K., Jiang C. Radiomics for predicting hematoma expansion in patients with hypertensive intraparenchymal hematomas. *Eur J Radiol* 2019; 115: 10–15, <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2019.04.001>.

45. Gupta V.P., Garton A.L.A., Sisti J.A., Christophe B.R., Lord A.S., Lewis A.K., Frey H.P., Claassen J., Connolly E.S. Jr. Prognosticating functional outcome after intracerebral hemorrhage: the ICHOP Score. *World Neurosurg* 2017; 101: 577–583, <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.02.082>.

46. Zhang L., Li J., Yin K., Jiang Z., Li T., Hu R., Yu Z., Feng H., Chen Y. Computed tomography angiography-based analysis of high-risk intracerebral haemorrhage patients by employing a mathematical model. *BMC Bioinformatics* 2019; 20(Suppl 7): 193, <https://doi.org/10.1186/s12859-019-2741-5>.

47. Kim J.S., Merrill R.K., Arvind V., Kaji D., Pasik S.D., Nwachukwu C.C., Vargas L., Osman N.S., Oermann E.K., Caridi J.M., Cho S.K. Examining the ability of artificial neural networks machine learning models to accurately predict complications following posterior lumbar spine fusion. *Spine (Phila Pa 1976)* 2018; 43(12): 853–860, <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000002442>.

48. Merali Z.G., Witiv C.D., Badhiwala J.H., Wilson J.R., Fehlings M.G. Using a machine learning approach to predict outcome after surgery for degenerative cervical myelopathy. *PLoS One* 2019; 14(4): e0215133, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215133>.

49. Karhade A.V., Ogink P., Thio Q., Broekman M., Cha T., Gormley W.B., Hershman S., Peul W.C., Bono C.M., Schwab J.H. Development of machine learning algorithms for prediction of discharge disposition after elective inpatient surgery for lumbar degenerative disc disorders. *Neurosurg Focus* 2018; 45(5): E6, <https://doi.org/10.3171/2018.8.focus18340>.

50. Galbusera F., Bassani T., Casaroli G., Gitto S., Zanchetta E., Costa F., Sconfienza L.M. Generative models: an upcoming innovation in musculoskeletal radiology? A preliminary test in spine imaging. *Eur Radiol Exp* 2018; 2(1): 29, <https://doi.org/10.1186/s41747-018-0060-7>.

51. Burström G., Buerger C., Hoppenbrouwers J., Nachabe R., Lorenz C., Babic D., Homan R., Racadio J.M., Grass M., Persson O., Edström E., Elmi Terander A. Machine learning for automated 3-dimensional segmentation of the spine and suggested placement of pedicle screws based on intraoperative cone-beam computer tomography. *J Neurosurg Spine* 2019; 31(1): 147–154, <https://doi.org/10.3171/2018.12.spine181397>.

52. Ames C.P., Smith J.S., Pellis F., Kelly M., Alanay A., Acaroğlu E., Pérez-Grueso F.J.S., Kleinstück F., Obeid I., Vila-Casademunt A., Shaffrey C.I. Jr., Burton D., Lafage V., Schwab F., Shaffrey C.I. Sr., Bess S., Serra-Burriel M.; European Spine Study Group, International Spine Study Group. 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. *Spine (Phila Pa 1976)* 2019; 44(13): 915–926, <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000002974>.

53. Lee S.I., Huang A., Mortazavi B., Li C., Hoffman H.A., Garst J., Lu D.S., Getachew R., Espinal M., Razaghy M., Ghalehsari N., Paak B.H., Ghavam A.A., Afridi M., Ostowari A., Ghasemzadeh H., Lu D.C., Sarrafzadeh M. Quantitative

assessment of hand motor function in cervical spinal disorder patients using target tracking tests. *J Rehabil Res Dev* 2016; 53(6): 1007–1022, <https://doi.org/10.1682/jrrd.2014.12.0319>.

54. Lee S.I., Park E., Huang A., Mortazavi B., Garst J.H., Jahanforouz N., Espinal M., Siero T., Pollack S., Afridi M., Daneshvar M., Ghias S., Lu D.C., Sarrafzadeh M. Objectively quantifying walking ability in degenerative spinal disorder patients using sensor equipped smart shoes. *Med Eng Phys* 2016; 38(5): 442–449, <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2016.02.004>.

55. Sharif Bidabadi S., Murray I., Lee G.Y.F., Morris S., Tan T. Classification of foot drop gait characteristic due to lumbar radiculopathy using machine learning algorithms. *Gait Posture* 2019; 71: 234–240, <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.05.010>.

56. Hu B., Kim C., Ning X., Xu X. Using a deep learning network to recognise low back pain in static standing. *Ergonomics* 2018; 61(10): 1374–1381, <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1481230>.

57. Karhade A.V., Ogink P.T., Thio Q.C.B.S., Cha T.D., Gormley W.B., Hershman S.H., Smith T.R., Mao J., Schoenfeld A.J., Bono C.M., Schwab J.H. Development of machine learning algorithms for prediction of prolonged opioid prescription after surgery for lumbar disc herniation. *Spine J* 2019; 19(11): 1764–1771, <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2019.06.002>.

58. Nam K.H., Seo I., Kim D.H., Lee J.I., Choi B.K., Han I.H. Machine learning model to predict osteoporotic spine with Hounsfield units on lumbar computed tomography. *J Korean Neurosurg Soc* 2019; 62(4): 442–449, <https://doi.org/10.3340/jkns.2018.0178>.

59. Forestier G., Petitjean F., Riffaud L., Jannin P. Automatic matching of surgeries to predict surgeons' next actions. *Artif Intell Med* 2017; 81: 3–11, <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2017.03.007>.

60. Watad A., Bragazzi N.L., Bacigaluppi S., Amital H., Watad A., Sharif K., Bisharat B., Siri A., Mahamid A., Abu Ras H., Nasr A., Bilotta F., Robba C., Adawi M. Artificial neural networks can be effectively used to model changes of intracranial pressure (ICP) during spinal surgery using different non invasive ICP surrogate estimators. *J Neurosurg Sci* 2018, <https://doi.org/10.23736/s0390-5616.18.04299-6>.

61. Greenan K., Taylor S.L., Fulkerson D., Shalalae K., Gerndt C., Krueger E.M., Zwienerberg M. Selection of children with ultra-severe traumatic brain injury for neurosurgical intervention. *J Neurosurg Pediatr* 2019; 1–10, <https://doi.org/10.3171/2019.1.peds18293>.

62. Zheng Z.S., Reggente N., Lutkenhoff E., Owen A.M., Monti M.M. Disentangling disorders of consciousness: insights from diffusion tensor imaging and machine learning. *Hum Brain Mapp* 2017; 38(1): 431–443, <https://doi.org/10.1002/hbm.23370>.

63. Jain S., Vyvere T.V., Terzopoulos V., Sima D.M., Roura E., Maas A., Wilms G., Verheyden J. Automatic quantification of computed tomography features in acute traumatic brain injury. *J Neurotrauma* 2019; 36(11): 1794–1803, <https://doi.org/10.1089/neu.2018.6183>.

64. Ko J., Hemphill M., Yang Z., Beard K., Sewell E., Shallcross J., Schweizer M., Sandmark D.K., Diaz-Arrastia R., Kim J., Meaney D., Issadore D. Multi-dimensional mapping of brain-derived extracellular vesicle microRNA biomarker for traumatic brain injury diagnostics. *J Neurotrauma* 2019, <https://doi.org/10.1089/neu.2018.6220>.

65. Heino I., Frantzén J., Rinne J., Girard R., Cao Y., Sajanti A., Katila A.J., Posti J.P., Takala R.S.K., Tenovu O., Koskimäki J. Risk factors for recurrent hematoma after surgery for acute traumatic subdural hematoma. *World Neurosurg* 2019; 124: e563–e571, <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.12.155>.
66. Rubin M.L., Yamal J.M., Chan W., Robertson C.S. Prognosis of six-month Glasgow Outcome Scale in severe traumatic brain injury using hospital admission characteristics, injury severity characteristics, and physiological monitoring during the first day post-injury. *J Neurotrauma* 2019; 36(16): 2417–2422, <https://doi.org/10.1089/neu.2018.6217>.
67. Zeiler F.A., Donnelly J., Cardim D., Menon D.K., Smielewski P., Czosnyka M. ICP versus laser Doppler cerebrovascular reactivity indices to assess brain autoregulatory capacity. *Neurocrit Care* 2018; 28(2): 194–202, <https://doi.org/10.1007/s12028-017-0472-x>.
68. Kim S., Scalzo F., Bergsneider M., Vespa P., Martin N., Hu X. Noninvasive intracranial pressure assessment based on a data-mining approach using a nonlinear mapping function. *IEEE Trans Biomed Eng* 2012; 59(3): 619–626, <https://doi.org/10.1109/tbme.2010.2093897>.
69. Yoo I.H., Song M. Biomedical ontologies and text mining for biomedicine and healthcare: a survey. *J Comput Sci Eng* 2008; 2(2): 109–136, <https://doi.org/10.5626/jcse.2008.2.2.109>.
70. Middleton B., Sittig D.F., Wright A. Clinical decision support: a 25 year retrospective and a 25 year vision. *Yearb Med Inform* 2016; 25(Suppl 1): S103–S116, <https://doi.org/10.15265/iyis-2016-s034>.
71. Campillo-Gimenez B., Garcelon N., Jarno P., Chaplain J.M., Cuggia M. Full-text automated detection of surgical site infections secondary to neurosurgery in Rennes, France. *Stud Health Technol Inform* 2013; 192: 572–575.
72. Tvardik N., Kergourlay I., Bittar A., Segond F., Darmoni S., Metzger M.H. Accuracy of using natural language processing methods for identifying healthcare-associated infections. *Int J Med Inform* 2018; 117: 96–102, <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2018.06.002>.
73. Liu W., Ni M., Jia W., Wan W., Tang J. Evidence-based medicine in neurosurgery: an academic publication view. *Neurosurg Rev* 2018; 41(1): 55–65, <https://doi.org/10.1007/s10143-016-0742-7>.
74. Mansouri A., Cooper B., Shin S.M., Kondziolka D. Randomized controlled trials and neurosurgery: the ideal fit or should alternative methodologies be considered? *J Neurosurg* 2016; 124(2): 558–568, <https://doi.org/10.3171/2014.12.jns142465>.
75. Buchlak Q.D., Esmaili N., Leveque J.C., Farrokhi F., Bennett C., Piccardi M., Sethi R.K. Machine learning applications to clinical decision support in neurosurgery: an artificial intelligence augmented systematic review. *Neurosurg Rev* 2019; 43(5): 1235–1253, <https://doi.org/10.1007/s10143-019-01163-8>.
76. Hana T., Tanaka S., Nejo T., Takahashi S., Kitagawa Y., Koike T., Nomura M., Takayanagi S., Saito N. Mining-guided machine learning analyses revealed the latest trends in neuro-oncology. *Cancers (Basel)* 2019; 11(2): 178, <https://doi.org/10.3390/cancers11020178>.
77. Sing D.C., Metz L.N., Dudli S. Machine learning-based classification of 38 years of spine-related literature into 100 research topics. *Spine (Phila Pa 1976)* 2017; 42(11): 863–870, <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000002079>.