

ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В НЕЙРОХИРУРГИИ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. ЧАСТЬ I: ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

DOI: 10.17691/stm2020.12.5.12
УДК 004.8/9:616.8–089:519.711.2
Поступила 1.04.2020 г.



Г.В. Данилов, к.м.н., ученый секретарь¹;

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

В последние годы увеличилось число научных публикаций, посвященных применению технологий искусственного интеллекта (ИИ), в первую очередь — машинного обучения, в нейрохирургии.

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 по июль 2019 г., в которых проанализированы результаты исследований технологий ИИ в нейрохирургии. Ключевые слова, специфические для каждой темы, были выделены с помощью технологий анализа естественного языка из области ИИ — алгоритмов тематического моделирования LDA и ARTM.

Результаты. Определены пять основных разделов нейрохирургии, в которых к настоящему времени ведутся исследования методов ИИ: нейроонкология, функциональная нейрохирургия, сосудистая нейрохирургия, спинальная нейрохирургия и хирургия черепно-мозговой травмы. Выделены основные тематические направления данных исследований.

Заключение. Информация об основных направлениях исследований ИИ в нейрохирургии может быть использована при планировании новых научных проектов.

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

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 in neurosurgery: a systematic review using topic modeling. Part I: major research areas. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2020; 12(5): 106–113, <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.5.12>

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

Artificial Intelligence in Neurosurgery: a Systematic Review Using Topic Modeling. Part I: Major Research Areas

G.V. Danilov, MD, PhD, Scientific Board Secretary¹;

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

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, 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

In recent years, the number of scientific publications on artificial intelligence (AI), primarily on machine learning, with respect to neurosurgery, has increased.

The aim of the study was to conduct a systematic literature review and identify the main areas of AI applications in neurosurgery.

Methods. Using the PubMed search engine, we found and analyzed 327 original articles published in 1996–2019. The key words specific to each topic were identified using topic modeling algorithms LDA and ARTM, which are part of the AI-based natural language processing.

Results. Five main areas of neurosurgery, in which research into AI methods are underway, have been identified: neuro-oncology, functional neurosurgery, vascular neurosurgery, spinal neurosurgery, and surgery of traumatic brain injury. Specifics of these studies are characterized.

Conclusion. The information presented in this review can be instrumental in planning new research projects in neurosurgery.

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

Введение

Понятие «искусственный интеллект» в настоящее время широко используется в разных сферах деятельности. В сознании общества образ искусственного интеллекта (ИИ) формируется благодаря средствам массовой информации, научной фантастике и научной литературе, однако часто не вполне соответствует действительности [1]. С «узкой» технической точки зрения ИИ — это математическая технология, автоматизирующая решение некоторой интеллектуальной задачи, традиционно решаемой человеком [2]. В то же время этим термином обозначают раздел компьютерных наук, в рамках которого такие решения разрабатываются [3]. В последнем случае под ИИ подразумевают целый спектр математических и программных технологий, в определенной степени имитирующих когнитивные функции человека.

Наиболее распространенные примеры таких технологий: «компьютерное зрение» (идентификация объектов на изображениях), распознавание голоса и речи, анализ текстов на естественном языке, машинный перевод. Во всех приведенных примерах

компьютер (ИИ) проявляет способности, присущие человеку: видеть, слушать, читать и понимать информацию. Становится актуальным вопрос: каким образом имитация традиционно человеческих интеллектуальных возможностей может быть полезной в медицине? Потенциал данных технологий — в автоматизации медицинских процессов, в первую очередь — диагностики заболеваний, принятия клинических решений и прогнозирования исхода лечения. Подобно тому, как станки и машины во время промышленной революции XVIII–XIX вв. автоматизировали ручной ремесленный труд человека, компьютер «у постели больного» должен ускорить время принятия клинических решений и повысить их надежность для улучшения качества и безопасности медицинской помощи. Именно с таких гуманистических позиций многими исследователями рассматривается ценность технологий ИИ в медицине [4–7].

Методы классической математической статистики, разработанные в условиях дефицита данных, позволяют по малому числу наблюдений делать научно обоснованные предположения о глобальных закономерностях. Большое число данных потенциально скрывает более сложные закономерности —

«цифровые отпечатки» явлений, которые невозможно выявить без применения специальных технологий. Именно такие технологии разрабатываются в области ИИ. Поскольку умение обрабатывать большое количество данных, воспринимаемых с помощью органов чувств, — естественное свойство человеческого мозга, мы интуитивно называем компьютерные программы, способные извлекать и анализировать информацию из визуальных, акустических и тактильных сигналов, искусственным интеллектом.

Как работают технологии ИИ? Математика, заложенная в их основу, позволяет находить и запоминать характерные паттерны в данных, которые не всегда могут быть интерпретированы человеком. Этот процесс называется машинным обучением (МО), которое фактически является математическим поиском наилучших решений систем уравнений. Результатом МО является математическая модель — функция с независимыми переменными (предикторами) и подобранными при МО параметрами. Например, во многих моделях для прогноза исхода лечения в качестве переменных используются возраст пациента и степень тяжести его заболевания, при этом на выходе модели — оценка исхода лечения (в цифровой или категориальной шкале). Параметры таких моделей подбираются при МО на большом количестве репрезентативных данных.

Преимущества технологий ИИ, на которые сейчас возлагают большие надежды, — это возможность использовать максимум доступной информации (даже в неструктурированном виде — изображениях и тексте) и находить в ней сложные и ценные закономерности.

Нейрохирургия — область клинической медицины, порождающая большое количество данных вследствие рутинного использования высокотехнологического медицинского оборудования и медицинских информационных систем. Это обстоятельство обуславливает потенциал применения технологий ИИ в нейрохирургии. Для планирования исследований в данном направлении важно понимать степень востребованности и внедрения данных технологий, а также выявлять перспективные направления использования ИИ. Настоящий обзор литературы ставит целью определение спектра задач применения технологий ИИ в нейрохирургии, а также выявление областей нейрохирургии, в которых они наиболее востребованы.

Методы

Обзор литературы выполнен с использованием рекомендаций PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) и дополнительным применением тематического моделирования для объективизации выделенных тем публикаций [8, 9].

В анализ были включены статьи из журналов и материалов международных конференций, соответствующие следующим критериям:

1) публикация является оригинальной исследовательской статьей;

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

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

4) нейрохирургия является потенциальной или фактической областью применения анализируемой в работе технологии ИИ.

Стратегия поиска литературы. Поиск литературы для обзора выполнен с помощью поисковой машины системы PubMed Национальной медицинской библиотеки США (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>). Запрос для поиска формулировался 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 — анализа больших массивов данных, МО). Точная и полная формулировка запроса к поисковой машине PubMed выглядела следующим образом: *“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 мы 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.

Тематическое моделирование. Экспертное разделение публикаций на темы объективизировали с помощью технологий тематического моделирования: алгоритма латентного размещения Дирихле (от англ. latent dirichlet allocation, LDA) и алгоритма аддитивной регуляризации тематических моделей (от англ. additive regularization of topic models, ARTM) [10, 11]. С помощью данных методов по текстам резюме отобранных журнальных работ выделяли специфические наборы слов, характеризующих каждую тему исследования из заданного экспертом числа тем. Незначительно варьируя количество тем (параметр тематической модели), подбирали наборы слов, наилучшим образом характеризующие отдельные темы. На завершающем шаге анализа сравнивали работы двух алгоритмов и интерпретировали темы исследований по найденным ключевым словам.

Программное обеспечение для получения и анализа данных. Первичный отбор и статистический анализ данных проведен с помощью специального программного обеспечения, разработанного авторами на языке программирования для статистического анализа R (версия 3.5.0) с помощью интегрированной среды разработки RStudio. Запрос к поисковому сервису PubMed выполняли через программный интерфейс (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK25501/>) из среды R с помощью пакета rentrez (https://cran.r-project.org/web/packages/rentrez/vignettes/rentrez_tutorial.html).

Для получения данных о публикациях и их анализа в среде R с помощью алгоритма LDA также использовали программные пакеты XML, fulltext, tibble, dplyr, stringr, tidy, tidytext, topicmodels. Модель ARTM разрабатывали с помощью программного языка Python (версия 3.6) в среде Jupyter Notebook.

Результаты

Процесс отбора исследовательских статей для изучения их тем представлен на рис. 1. В результате выполнения поискового запроса 24 июля 2019 г. в базах данных PubMed была идентифицирована 731 работа. В соответствии с критериями включения для экспертного анализа и тематического моделирования отобраны 327 работ, опубликованных в период с 1996 по 2019 г.

Общая характеристика проанализированных публикаций. Распределение числа отобранных работ по годам показано на рис. 2. В 2018 г. и первой половине 2019 г. произошло существенное увеличение числа работ, посвященных технологиям ИИ в нейрохирургии.

Большинство анализируемых исследований было проведено в рамках 5 крупных разделов нейрохирургии и одного смешанного раздела:

- 1) нейроонкология (n=133; 41%);
- 2) функциональная нейрохирургия (n=62; 19%);
- 3) сосудистая нейрохирургия (n=44; 14%);
- 4) спинальная нейрохирургия (n=29; 8%);
- 5) хирургия черепно-мозговой травмы (n=26; 8%);
- 6) другие и смежные разделы нейрохирургии (n=33; 10%).

Для публикаций из каждой 5 первых вышеуказанных разделов провели тематическое моделирование. Количество тем было первично подобрано с помощью LDA (так, чтобы темы максимально различались по интерпретации ключевых слов) и использовано далее в алгоритме ARTM. Темы, полученные в результате применения методов LDA и ARTM, сопоставляли друг с другом. В случаях, когда алгоритм ARTM создавал две или более схожих, явно не разделяемых темы, их приписывали к одной аналогичной теме по LDA. Результаты тематического моделирования с использованием алгоритмов LDA и ARTM (основные специфичные ключевые слова и интерпретация



Рис. 1. Схема, отражающая процесс отбора работ для систематического обзора в соответствии с международными рекомендациями PRISMA [8]

тем) представлены в таблице. Полный список из 327 проанализированных публикаций представлен в Приложении к статье (<https://drive.google.com/>

file/d/1qjnhvgj4d6LPk0sFRr639mbyujg_j8LF/view?usp=sharing).

Как видно из таблицы, два алгоритма в целом

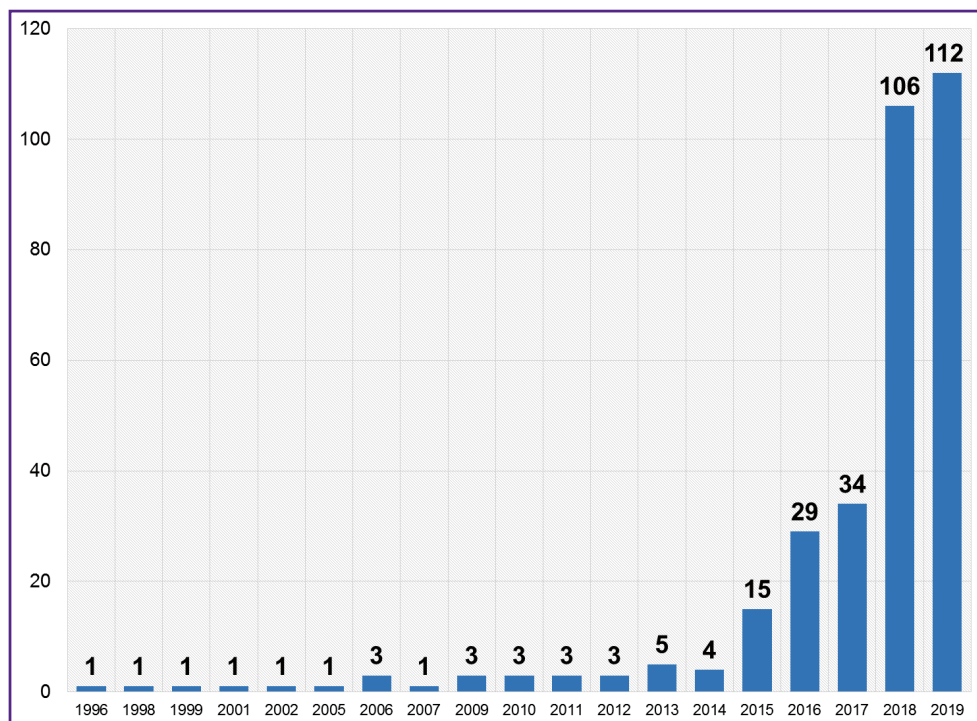


Рис. 2. Распределение числа проанализированных работ (n=327) по годам публикации

Основные темы и соответствующие ключевые слова из публикаций в области нейроонкологии, функциональной, сосудистой и спинальной нейрохирургии, хирургии черепно-мозговой травмы, выделенные с использованием алгоритмов тематического моделирования LDA и ARTM

Области нейрохирургии	№ п/п	Тема (LDA)	Ключевые слова (LDA)	Ключевые слова (ARTM)
Нейроонкология (n=133)	1	Неинвазивное определение степени злокачественности опухоли по данным нейровизуализации	Grade, MRI, tumor, imaging	MRI, imaging, tumor, images, grade, glioma
	2	Неинвазивная молекулярная диагностика по данным нейровизуализации	Tumor, status, imaging, mutation, gliomas, classification	Tumor, imaging, prediction, glioma, gene
	3	Сегментация структур мозга и волюметрия по данным нейровизуализации	Segmentation, MRI, tumor, volume	—
	4	Прогноз осложнений и исходов лечения	Tumor, results, treatment	Results, tumor, MRI, prediction, surgery, performance, glioblastoma Gliomas, clinical, imaging, methods, tumor, survival, features, cancer, glioblastoma
Функциональная нейрохирургия (включая хирургию эпилепсии) (n=62)	1	Диагностика эпилепсии	Seizure, STN, epilepsy, stimulation, network, microelectrode	Seizure, stimulation, MRI, rate
	2	Прогноз исходов лечения эпилепсии	Seizure, outcome, classification, epilepsy, feature	Epilepsy, networks, EEG, outcome, DBS, deep, signals
	3	Детекция приступов; прогноз приступов	Seizure, rate, networks, detection, neural	Surgery, seizure, stimulation, results, STN, disease, deep, network, detection, DBS Epilepsy, clinical, neural, lobe, TLE, EEG, DBS, seizures

Продолжение таблицы

Области нейрохирургии	№ п/п	Тема (LDA)	Ключевые слова (LDA)	Ключевые слова (ARTM)
	4	Диагностика болезни Паркинсона	PD, detection	—
Сосудистая нейрохирургия (n=44)	1	Диагностика и кластеризация аневризм	MRA, vascular, vessel, aneurysm, segmentation, VAFA	Rupture, radiomics aneurysms, imaging Predicting, results, aneurysm, classification
	2	Прогноз разрыва аневризмы	Aneurysm, hemorrhage, prediction, biomarkers	Risk, hemorrhage, prediction, images outcome, imaging aneurysm
	3	Прогноз исходов для разорвавшихся аневризм	Aneurysm, rupture, unruptured, functional, score, moth	Hemorrhage, aneurysm, outcome, segmentation, prediction Rupture, aneurysms, predict, outcomes, stroke, consciousness Outcome, functional, hemorrhage, aneurysm, score, risk, outcomes, rupture
	4	Диагностика болезни Мойя-мойя, артериовенозной фистулы, аневризм	Aneurysm, rupture, MMD, images, DAVF, ACom	—
	5	Диагностика и прогноз осложнений интракраниального каротидного стеноза	Stroke, results, risk, CAS, predicting, ischemic	Stroke, prediction, ischemic
	6	Прогноз осложнений лечения артериовенозной мальформации	Predictors, radiomics, classification, epilepsy, BAVS, hemorrhage	—
	7	Прогноз исхода лечения артериовенозной мальформации	Parenchyma, ASAH, nidal, CTP, AVM, outcome, functional	—
	8	Диагностика и сегментация интракраниального кровоизлияния	Radiomics, hematomas, prediction, physiologic	Segmentation, hemorrhage, vessel, risk, predictors, aneurysms Hemorrhage, cerebral, radiomics
	9	Прогноз исхода интракраниального кровоизлияния	Outcome, hemorrhage, imaging, perfusion, deficit, consciousness	—
Спинальная нейрохирургия (n=29)	1	Неинвазивная оценка внутричерепного давления	Predictive, spine, ICP	—
	2	Прогноз вариантов выписки из стационара	Spinal, discharges, cord, lumbar, LSS, fusion, functional, elective	—
	3	Классификация походки	Gait, images, foot, t2w, drop, results, spine, SRS, recovery	—
	4	Прогноз осложнений лечения	Complications, surgery, risk, predicting, spine	Spine, results, prediction, predicting, complications
	5	Прогноз исходов лечения	Spinal, patients, cord, patient, surgery, models, prediction, results, spine, outcome, based, MCID, opioid, measures, predicted	Predictive, spine, spinal, quality, following, outcome, prediction, results Lumbar, predict, spinal, spine, LSS, results, disc, preoperative Spinal, spine, cord, images, lumbar, fusion Surgery, results, spinal, prediction, surgical, predictive, spine
Хирургия черепно-мозговой травмы (n=26)	1	Прогноз летального исхода	TBI, injury, mortality, risk	Traumatic, injury, risk, mortality, time
	2	Анализ внутричерепного давления, среднего артериального давления, церебрального перфузионного давления и ауторегуляции	ICP, derived, indices, CPP, ABP, pressure	TBI, injury, traumatic, outcome, ICP, prediction, mortality

Области нейрохирургии	№ п/п	Тема (LDA)	Ключевые слова (LDA)	Ключевые слова (ARTM)
	3	Диагностика угнетения сознания и степени тяжести черепно-мозговой травмы	TBI, injury, outcome, decision	—
	4	Прогноз исходов черепно-мозговой травмы	TBI, injury, outcome, traumatic, outcomes, activation	Injury, TBI, outcome, prediction, traumatic, mortality Injury, TBI, activation, outcomes, time

приводят к схожему разделению тематик публикаций по ключевым словам. Более подробно применение технологий ИИ для каждого раздела нейрохирургии будет описано во второй части данной работы.

Обсуждение

Несмотря на значительное развитие технологий ИИ, машинного обучения и сопряженных методов анализа больших данных в начале XXI в., такие подходы все еще не получили масштабного и систематического применения в нейрохирургии и во многом находятся на стадиях разработки и апробации. Объективным ограничением для быстрого развития данного направления является, безусловно, традиционный для медицины лимит объема качественно собранных данных.

В то же время в результате усиления интереса к этому направлению исследований появляются основания для формирования доказательной базы по эффективности, безопасности и экономической целесообразности методов ИИ в нейрохирургии. Так, в систематическом обзоре J.T. Senders с соавт. [12] описаны 23 исследования, в которых оценивалась эффективность технологий ИИ для решения диагностических и прогностических задач в сравнении с точностью врачебных суждений в нейрохирургии. В 14 из этих работ решались диагностические (классификационные) задачи, преимущественно на данных нейровизуализации и электроэнцефалографии. В 7 публикациях исследовались вопросы предоперационного планирования на основе анализа изображений. В 3 работах прогнозировались исходы нейрохирургического лечения. В обзоре показано, что МО в целом может улучшить результаты решения клинических задач. В 29 из 50 (58%) тестов, проведенных суммарно в 23 исследованиях, результаты МО значительно превосходили точность заключений клинических экспертов ($p < 0,05$); в 18 из 50 (36%) случаев не выявлено существенной разницы между МО и показателями экспертов; в 3 из 50 (6%) клинические эксперты решали задачи лучше, чем МО ($p < 0,05$). В 4 работах, в которых оценивалась производительность МО в дополнение к работе эксперта, такое взаимное дополнение оказалось более результативным по сравнению с производительностью МО или клинициста по отдельности. Данный результат

скорее подтверждает гипотезу о потенциале ИИ для практического использования в нейрохирургии.

В настоящее время не накоплена достаточная доказательная база по оценке эффективности, безопасности и экономической целесообразности методов ИИ в нейрохирургии, поэтому нет оснований считать, что технологии ИИ сегодня способны тотально заменить традиционные, рутинные методы медицины. Однако, учитывая значительный потенциал ИИ, можно говорить с большой очевидностью о необходимости развития и широкой апробации этих методов в научной и практической медицинской деятельности.

В данной работе для выделения ключевых тем публикаций использованы методы тематического моделирования. Эти методы относятся к классу технологий ИИ и применяются для анализа текстов, написанных на естественном языке. С помощью тематического моделирования для каждого раздела нейрохирургии были выделены от 4 до 9 крупных тем — направлений исследований. Подобный подход является основой для автоматического отслеживания публикационных трендов по заданным направлениям исследований и может служить одним из примеров использования ИИ в биомедицинской науке.

Ниже рассмотрим ограничения данной работы, важные для интерпретации ее результатов. Систематический обзор направлен на изучение направлений и тенденций применения ИИ непосредственно в нейрохирургии. В то же время в смежных областях (например, нейровизуализации) круг задач, решаемых с помощью ИИ, может быть гораздо шире и потенциально является актуальным и для нейрохирургии. Данный круг вопросов не освещен в нашей работе.

В рамках настоящего исследования мы не анализировали систематические обзоры других авторов, поскольку большинство таких публикаций по теме ИИ в нейрохирургии были сфокусированы на определенном дизайне оригинальных исследований или на определенной специфической патологии и поэтому имели узкие критерии включения.

Заключение

Исследования по применению технологий искус-

венного интеллекта к настоящему времени проведены преимущественно в пяти крупных разделах нейрохирургии: нейроонкологии, функциональной, сосудистой и спинальной нейрохирургии и в разделе черепно-мозговой травмы. С помощью методов тематического моделирования в каждом разделе выделены основные направления исследований. Во второй части данного обзора будет рассмотрен спектр задач, для решения которых в нейрохирургии были использованы технологии искусственного интеллекта.

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. Исследование поддержано грантом Российского фонда фундаментальных исследований 19-29-01174.

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Литература/References

1. Ng A. What artificial intelligence can and can't do right now. *Harv Bus Rev* 2016.
2. Якушев Д.И. Об определении искусственного интеллекта. В кн.: *Региональная информатика и информационная безопасность*. СПб; 2016; с. 67–69.
Yakushev D.I. Ob opredelenii iskusstvennogo intellekta. V kn.: *Regional'naya informatika i informatsionnaya bezopasnost'* [On the definition of artificial intelligence. In: Regional informatics and information security proceedings]. Saint Peterburg; 2016; p. 67–69.
3. Люгер Дж.Ф. *Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем*. М: Издательский дом «Вильямс»; 2003.
Luger J.F. *Iskusstvennyy intellekt: strategii i metody*

resheniya slozhnykh problem [Artificial intelligence: strategies and methods for solving complex problems]. Moscow: Izdatel'skiy dom "Vil'yams"; 2003.

4. Celticki E. A systematic review on machine learning in neurosurgery: the future of decision-making in patient care. *Turk Neurosurg* 2018; 28(2): 167–173, <https://doi.org/10.5137/1019-5149.jtn.20059-17.1>.

5. Brusko G.D., Kolcun J.P.G., Wang M.Y. Machine-learning models: the future of predictive analytics in neurosurgery. *Neurosurgery* 2018; 83(1): E3–E4, <https://doi.org/10.1093/neuros/nyy166>.

6. Tandel G.S., Biswas M., Kakde O.G., Tiwari A., Suri H.S., Turk M., Laird J.R., Asare C.K., Ankrah A.A., Khanna N.N., Madhusudhan B.K., Saba L., Suri J.S. A review on a deep learning perspective in brain cancer classification. *Cancers (Basel)* 2019; 11(1), <https://doi.org/10.3390/cancers11010111>.

7. Senders J.T., Zaki M.M., Karhade A.V., Chang B., Gormley W.B., Broekman M.L., Smith T.R., Arnaout O. An introduction and overview of machine learning in neurosurgical care. *Acta Neurochir (Wien)* 2018; 160(1): 29–38, <https://doi.org/10.1007/s00701-017-3385-8>.

8. 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>.

9. Воронцов К.В. *Вероятностное тематическое моделирование: теория, модели и проект BigARTM*. 2020. URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/d/d5/Voron17survey-artm.pdf>.

Vorontsov K.V. *Veroyatnostnoe tematicheskoe modelirovanie: teoriya, modeli i proekt BigARTM* [Probabilistic topic modeling: theory, models and the BigARTM project]. 2020. URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/d/d5/Voron17survey-artm.pdf>.

10. Blei D.M., Ng A.Y., Jordan M.I. Latent dirichlet allocation. *J Mach Learn Res* 2003; 3: 3993–1022.

11. Воронцов К.В. Аддитивная регуляризация тематических моделей коллекций текстовых документов. *Доклады Академии наук* 2014; 456(3): 268–271, <https://doi.org/10.7868/s0869565214090096>.

Vorontsov K.V. Additive regularization of topic models of collections of text documents. *Doklady Akademii nauk* 2014; 456(3): 268–271, <https://doi.org/10.7868/s0869565214090096>.

12. Senders J.T., Arnaout O., Karhade A.V., Dasenbrock H.H., Gormley W.B., Broekman M.L., Smith T.R. Natural and artificial intelligence in neurosurgery: a systematic review. *Neurosurgery* 2018; 83(2): 181–192, <https://doi.org/10.1093/neuros/nyx384>.