

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL RESEARCH

УДК 616.832-004.21

<http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-2-58-65>© Морозов С.П., Владзимирский А.В., Черняева Г.Н., Бажин А.В., Пимкин А.А., Беляев М.Г.,
Кляшторный В.Г., Горшкова Т.Н., Курочкина Н.С., Якушева С.Ф., 2020**ВАЛИДАЦИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМА
«ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА» ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ РАССЕЯННОГО
СКЛЕРОЗА В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ПОЛИКЛИНИКИ**¹С. П. Морозов, ¹А. В. Владзимирский, ^{1,3}Г. Н. Черняева, ^{1,2}А. В. Бажин, ⁴А. А. Пимкин, ⁴М. Г. Беляев,
¹В. Г. Кляшторный, ¹Т. Н. Горшкова, ⁴Н. С. Курочкина, ⁵С. Ф. Якушева¹Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города
Москвы, Москва, Российская Федерация²Городская поликлиника № 2 Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия³Медицинский центр в Коломенском, Москва, Россия⁴Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия⁵Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

Цель: оценить диагностическую точность оригинального алгоритма выявления РС в условиях отделения лучевой диагностики медицинской организации, оказывающей первичную (амбулаторно-поликлиническую) медицинскую помощь. *Материалы и методы.* Проведен анализ деперсонализированных результатов МР-исследований головного мозга, выполненных 93 пациентам в период с 22.08.2019 г. по 26.09.2019 г., из которых 42 мужчины (средний возраст $47,5 \pm 15,9$ лет) и 51 женщина (средний возраст $52,3 \pm 16,8$ лет); лица европеоидной расы, жители г. Москвы. Все пациенты подписали добровольное информированное согласие. Исследования проводились на томографе VANTAGE Atlas (Toshiba, Япония) с индукцией магнитного поля 1,5 Тл по стандартному протоколу.

Результаты. Все МР-исследования проанализированы с применением оригинального алгоритма «искусственного интеллекта» (ИИ). Решения алгоритма (индекс-теста) сопоставлены с референс-тестом, значения которого приняты за истинный статус обследуемых лиц. Чувствительность индекс-теста — 100%, специфичность — 75,3%, точность — 76,3%, прогностическая ценность отрицательного результата — 100%, площадь под характеристической кривой — 0,861. Результаты свидетельствуют о надежном «отсевании» алгоритмом результатов исследований без признаков РС. Показано достаточное качество и отличная воспроизводимость результатов работы алгоритма на независимых данных.

Заключение. Разработанный алгоритм ИИ обеспечивает эффективную сортировку МР-исследований в условиях первичного звена здравоохранения с поддержанием оптимального уровня настороженности относительно РС.

Ключевые слова: искусственный интеллект, нейронная сеть, рассеянный склероз, магнитно-резонансная томография

Контакт: Бабкин Владимир Андреевич, v.babkin@nrcmr.ru© Morozov S.P., Chernyaeva G.N., Bazhin A.V., Pimkin A.A., Belyaev M.G., Vladzimirsky A.V.,
Klyashtornyi V.G., Gorshkova T.N., Kurochkina N.S., Yakusheva S.F., 2020**VALIDATION OF DIAGNOSTIC ACCURACY OF AN ARTIFICIAL
INTELLIGENCE ALGORITHM FOR DETECTING MULTIPLE SCLEROSIS
IN A CITY POLYCLINIC SETTING**¹Sergey P. Morozov, ^{1,3}Galina N. Chernyaeva, ^{1,2}Aleksandr V. Bazhin, ^{4,5}Artem A. Pimkin, ⁴Mihail G. Belyaev,
¹Anton V. Vladzimirsky, ¹Vladislav G. Klyashtornyi, ¹Tamara N. Gorshkova, ⁴Nadezhda S. Kurochkina,
⁵Sofya F. Yakusheva¹Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department,
Moscow, Russia²City Polyclinic No 2 of the Moscow Health Care Department, Moscow, Russia³Medical Center in Kolomenskoye, Moscow, Russia⁴Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia⁵Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

The objective of the study is to evaluate the diagnostic accuracy of an original artificial intelligence (AI) algorithm for detecting MS in the radiology department of primary (outpatient) hospital.

Materials and methods. Depersonalized results of brain magnetic resonance imaging (MRI) studies performed in the period from August 22, 2019 to September 26, 2019 in 93 patients (42 men (mean age $47,5 \pm 15,9$ years) and 51 women (mean age $52,3 \pm 16,8$ years)) were analyzed. All patients signed a voluntary informed consent form. Brain MRI were carried out on the VANTAGE Atlas 1,5T MRI scanner (Toshiba, Japan) under a standard protocol.

Results. All MRI studies were analyzed by AI-algorithm (index-test). Its decisions were compared with a reference test (ground-truth). The sensitivity of the index-test is 100%, specificity — 75,3%, accuracy — 76,3%, negative predictive value — 100%, area under ROC-curve — 0,861. The algorithm reliably sorts out the studies without signs of MS. The algorithm shows sufficient quality and excellent reproducibility of the results on independent data.

Conclusion. The developed AI algorithm ensures effective triage of MRI studies in primary care settings, maintaining an optimal index of suspicion in MS.

Key words: artificial intelligence, radiology, multiple sclerosis, magnetic resonance imaging

Contact: Babkin Vladimir Andreevich, v.babkin@npcmr.ru

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Морозов С.П., Владзимирский А.В., Черняева Г.Н., Бажин А.В., Пимкин А.А., Беляев М.Г., Кляшторный В.Г., Горшкова Т.Н., Курочкина Н.С., Якушева С.Ф. Валидация диагностической точности алгоритма «искусственного интеллекта» для выявления рассеянного склероза в условиях городской поликлиники // Лучевая диагностика и терапия. 2020. Т. 11, № 2. С. 58–65, <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-2-58-65>.

Conflict of interests: the author stated that there is no potential conflict of interests.

For citation: Morozov S.P., Chernyaeva G.N., Bazhin A.V., Pimkin A.A., Belyaev M.G., Vladzimirsky A.V., Klyashtornyi V.G., Gorshkova T.N., Kurochkina N.S., Yakusheva S.F. Validation of diagnostic accuracy of an artificial intelligence algorithm for detecting multiple sclerosis in a city polyclinic setting // Diagnostic radiology and radiotherapy. 2020. Vol. 11, No. 2. P. 58–65, <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-2-58-65>.

Введение. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) на сегодняшний день в мире насчитывается более 2 млн больных рассеянным склерозом (РС), в Российской Федерации (РФ) эта цифра достигает 200 тыс. В ряде субъектов РФ, преимущественно в крупных промышленных городах, заболеваемость рассеянным склерозом относительно высокая, порядка 20–40 случаев на 100 тыс. населения, причем каждый год регистрируется около 5 тыс. новых случаев рассеянного склероза [1, 2]. Среди неврологических заболеваний РС является основной причиной стойкой инвалидизации лиц молодого возраста [3, 4]. Это заболевание может возникнуть в любом возрасте, но более чем в 50% случаев дебют заболевания приходится на вторую-четвертую декаду жизни, т.е. в наиболее социально активный период жизни человека [5]. Дебют рассеянного склероза у детей (до 10-летнего возраста) отмечается менее чем у 1% больных, в 10–20 лет — у 15–20%, после 50 лет — менее чем у 1% [6].

На сегодняшний день основным общепризнанным методом диагностики и мониторинга течения РС является магнитно-резонансная томография (МРТ). Для повышения эффективности использования МРТ головного и спинного мозга у пациентов с подозрением на наличие РС в конце 80-х годов прошлого столетия были разработаны МР-критерии МакДоналда, а затем и критерии MAGNIMS. Указанные критерии регулярно пересматриваются в связи с появлением новых знаний и результатов клинических исследований; они успешно применяются как для диагностики ремиттирующего, так и для первично-прогрессирующего РС. Указанные выше критерии позволяют рентгенологам и невро-

логам оптимизировать использование МРТ в клинической практике для диагностики РС [7–9].

Как известно, лечение любого заболевания наиболее эффективно на начальных стадиях, в связи с чем особенно важной является ранняя, быстрая и точная диагностика РС. Точное и своевременное выявление данного заболевания особенно критично для лиц молодого возраста и пациентов с радиологически изолированным синдромом, так как раннее выявление РС оказывает существенное влияние на выбор тактики его лечения, а следовательно, и на социально-экономический статус и качество жизни пациентов. Несмотря на достигнутый уровень лучевой диагностики рассеянного склероза, остается нерешенным вопрос качества первичного его выявления в условиях амбулаторно-поликлинического звена.

Представляется целесообразным использование современных средств автоматизированного анализа диагностических изображений (на основе технологий искусственного интеллекта) для поддержки принятия решений врачей первичного уровня медико-санитарной помощи относительно МР-диагностики РС [10–13]. Тем более с учетом того, что, согласно критериям МакДоналда, распространение в пространстве рассеянного склероза при первичном МР-исследовании фиксируется на наличии очагов лишь в двух локациях [14].

Ранее нами был разработан алгоритм «искусственного интеллекта» (ИИ) для выявления рассеянного склероза, точность которого была подтверждена экспериментально с помощью кросс-проверки, состоящей из многократного разбиения набора данных на обучающий и контрольный блоки с последующей оценкой скользящего контроля, получаемой путем усреднения величины ошибки на контрольных блоках в различных разбиениях.

Согласно методологии клинико-технических испытаний интеллектуальных систем, обязательным является валидация диагностической точности ИИ на независимых данных [15, 16]. Такая валидация должна осуществляться в условиях, аналогичных условиям будущей рутинной эксплуатации алгоритма.

Цель: оценить диагностическую точность оригинального алгоритма выявления рассеянного склероза в условиях отделения лучевой диагностики медицинской организации, оказывающей первичную (амбулаторно-поликлиническую) медицинскую помощь.

Материалы и методы. Проведено проспективное диагностическое исследование в соответствии с методологией для испытаний «искусственного интеллекта» в сфере лучевой диагностики [15, 16].

В базу данных включены деперсонализированные результаты МР-исследований головного мозга, выполненные пациентам ГБУЗ г. Москвы «Городская поликлиника № 2 ДЗМ» в период с 22.08 по 26.09.2019 г.

Организационно-методическое обеспечение, статистическая и аналитическая обработка результатов выполнена сотрудниками ГБУЗ г. Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ».

Всего было 93 обследуемых лица: 42 мужчины (средний возраст $47,5 \pm 15,9$ года) и 51 женщина (средний возраст $52,3 \pm 16,8$ года); лица европеоидной расы, жители г. Москвы. Все пациенты подписали добровольное информированное согласие.

Всем обследуемым выполнена магнитно-резонансная томография головного мозга. Исследования проводились на томографе VANTAGE Atlas (Toshiba, Япония) с индукцией магнитного поля 1,5 Тл по стандартному протоколу.

Если в направлении на исследование был указан диагноз, не связанный с демиелинизирующим процессом, то выполнялось МР-исследование головного мозга по стандартному протоколу с толщиной срезов 5 мм, включающему:

- T2-взвешенные изображения (ВИ) в аксиальной и сагиттальной плоскостях;
- T2-ВИ с подавлением свободной жидкости (FLAIR) в аксиальной плоскости;
- диффузионно-взвешенные изображения в аксиальной плоскости;
- T1-ВИ в корональной плоскости.

При направлении пациента с подозрением на демиелинизирующий процесс — исследование проводилось по специализированному протоколу с получением изображений толщиной срезов 3 мм, включающему:

- T2-ВИ в сагиттальной и аксиальной плоскостях;
- T2-FLAIR в аксиальной, сагиттальной и корональной плоскостях;
- T1-ВИ изотропные изображения в аксиальной плоскости.

При анализе результаты исследований были разделены на две группы: 1-я группа — рассеянный склероз ($n=4$); 2-я группа — иная патология или норма ($n=89$).

Критерии для включения в 1-ю группу:

- наличие очагов характерной локализации (перивентрикулярной, юстакортикальной/кортикальной, инфратенториальной, в спинном мозге); классификация очагов проводилась в соответствии с критериями МакДональда в редакции 2017 года;
- наличие клинико-лабораторного подтверждения наличия РС.

Критерий для включения во 2-ю группу: отсутствие признаков рассеянного склероза по результатам МРТ.

Референс-тест: каждое исследование интерпретировано в два этапа. Первично — врачом-рентгенологом, непосредственно проводившим исследование; второе чтение проводилось двумя врачами-рентгенологами (заведующим отделением и независимым врачом-экспертом). При отсутствии расхождений во мнении исследование относили к одной из двух групп. При наличии расхождений исследование интерпретировалось повторно, коллегиально, с участием врача-рентгенолога с субспециализацией по нейрорадиологии, после чего исследование относили к одной из двух групп.

Пациенты с итоговым заключением о возможном наличии демиелинизирующего процесса направлялись на консультацию в межкрупное отделение рассеянного склероза, где им проводилось полное клиническое обследование, а также исследование ликвора на олигоклональные антитела IgG.

Индекс-тест: алгоритм «искусственного интеллекта», состоящий из многоэтапной обработки исследования. Первым этапом является предобработка данных, содержащая, в частности, выравнивание снимка на шаблон [17] и нормализацию воксельных интенсивностей для приведения исследования к унифицированному виду. Второй этап алгоритма заключается в сопоставлении исследованию трех чисел, соответствующих вероятностям принадлежности исследования к подгруппе «Рассеянный склероз», «Иная патология» или «Норма», с помощью трехмерной сверточной нейронной сети с архитектурой ResNet [18]. Последним этапом является принятие решения о принадлежности обрабатываемого исследования к подгруппе «Рассеянный склероз» с помощью порога активации («cut-off»). С учетом особенностей условий проведения исследования при анализе результатов подгруппы «Иная патология» и «Норма» были объединены в одну группу «Иная патология или норма» (как указано выше).

Исследуемый алгоритм был развернут на отдельной рабочей станции. Результаты проводимых исследований проходили процедуру деперсонализации, после чего (параллельно основному производственному процессу) направлялись на данную станцию,

где подвергались автоматизированному анализу. Врач, непосредственно проводивший исследования, оценивал решения алгоритма. Далее исходное исследование передавалось экспертам для ретроспективной оценки. Согласованная позиция по результатам исследования являлась «золотым стандартом».

По завершению сбора данных произведено сопоставление решений алгоритма с результатами референс-теста; построена четырехпольная таблица, произведен расчет показателей (чувствительность, специфичность, точность (общая валидность), отношение правдоподобия и прогностическая ценность положительного/отрицательного результата), построена и проанализирована характеристическая кривая (ROC-кривая). Для каждого из указанных диагностических показателей рассчитан 95% доверительный интервал (ДИ).

Порог активации («cut-off») для данного алгоритма ИИ составил $\geq 99,87\%$. Указанное значение было определено как оптимальное с помощью трех различных методик Юндена, Лю и методики поиска точки, максимально приближенной к верхнему левому углу ROC-кривой.

Результаты и их обсуждение. В исследуемую выборку включены 93 МР-исследования. У обследованных лиц имели место объемные образования головного мозга, последствия черепно-мозговых травм, острых нарушений мозгового кровообращения, а также — очаговые изменения. Структура таких изменений у пациентов обеих групп приведена в табл. 1.

Все МР-исследования проанализированы с применением оригинального алгоритма «искусственного интеллекта». Решения алгоритма ИИ сопоставлены с референс-тестом, значения которого приняты за истинный статус обследуемых лиц. В результате получено 4 истинно-положительных решения, 67 — истинно-отрицательных, 22 — ложноположительных, 0 — ложноотрицательных (рис. 1, 2).

Таблица 1

Структура очаговых изменений головного мозга у пациентов обеих групп

Table 1

Structure of focal brain changes in patients of both groups

| Характер патологических изменений | Количество пациентов | |
|--|----------------------|------|
| | абс. число | % |
| Сосудистые очаги | 85 | 91,4 |
| Расширенные периваскулярные пространства | 32 | 34,4 |
| Лакунарные кисты | 9 | 9,7 |
| Очаги демиелинизирующего характера | 4 | 4,3 |

Примечание. У одного пациента могли фиксироваться очаговые изменения различного характера.

Note: one patient could demonstrate focal lesions of a different genesis.

В табл. 2 представлены метрики диагностической точности, на рис. 3 приведена соответствующая

характеристическая кривая.

Полученные нами значения свидетельствуют о достаточно высоком качестве алгоритма ИИ. Чувствительность индекс-теста составляет 100%, специфичность — 75,3%, точность 76,3%.

При этом необходимо отметить большую неопределенность значения чувствительности с нижней границей 95% доверительного интервала 0,398.

В условиях потока исследований городской поликлиники авторский алгоритм ИИ отличается принципиально более низким значением прогностической ценности положительного результата (15,4%) на фоне прогностической ценности отрицательного результата в 100%. Это означает практически полную гарантию отсутствия рассеянного склероза в случаях, которые были отнесены нашим алгоритмом ИИ к подгруппе 2. Этот результат полагаем наиболее значимым, доказывающим возможность применения технологий «искусственного интеллекта» для сортировки МР-исследований центральной нервной системы в условиях первичного звена.

В сравнении с данными литературы авторский алгоритм отличается высокой чувствительностью (впрочем, на фоне низкой вероятности наличия целевой патологии в популяции) и несколько пониженной специфичностью, а также общей точностью по сравнению с данными других авторов (табл. 3). Это объясняется относительно высоким уровнем ложноположительных решений нашего алгоритма: 22 решения из 93 случаев, то есть около 24% случаев было отнесено к категории «Рассеянный склероз» ошибочно. Однако это не снижает положительную оценку работы алгоритма по двум причинам:

1) в условиях городской поликлиники представляется актуальной повышенная настороженность в отношении крайне значимых, но относительно редко встречающихся состояний;

2) исследование точности нашего алгоритма проводилось без его предварительной калибровки (точной настройки) на результатах исследований, проводимых в данной городской поликлинике. С одной стороны, это свидетельствует о высоком качестве алгоритма, отличной воспроизводимости результатов его работы, а с другой — остается возможность для еще большего повышения качества диагностических решений путем тонкой настройки.

Более низкая специфичность авторского алгоритма объясняется возрастом пациентов в исследуемых группах и соответствующим наличием большого количества очагов сосудистого генеза.

В нашей работе средний возраст пациентов составлял 47,5 лет у мужчин и 52,3 года у женщин, при этом диапазоны колебаний составляли 31,6–63,4 и 35,5–69,1 соответственно. Значение специфичности было 75,3%.

В двух исследованиях со значительно большими значениями этого показателя (98,76 и 96,15%) средний возраст составлял [22, 23]:

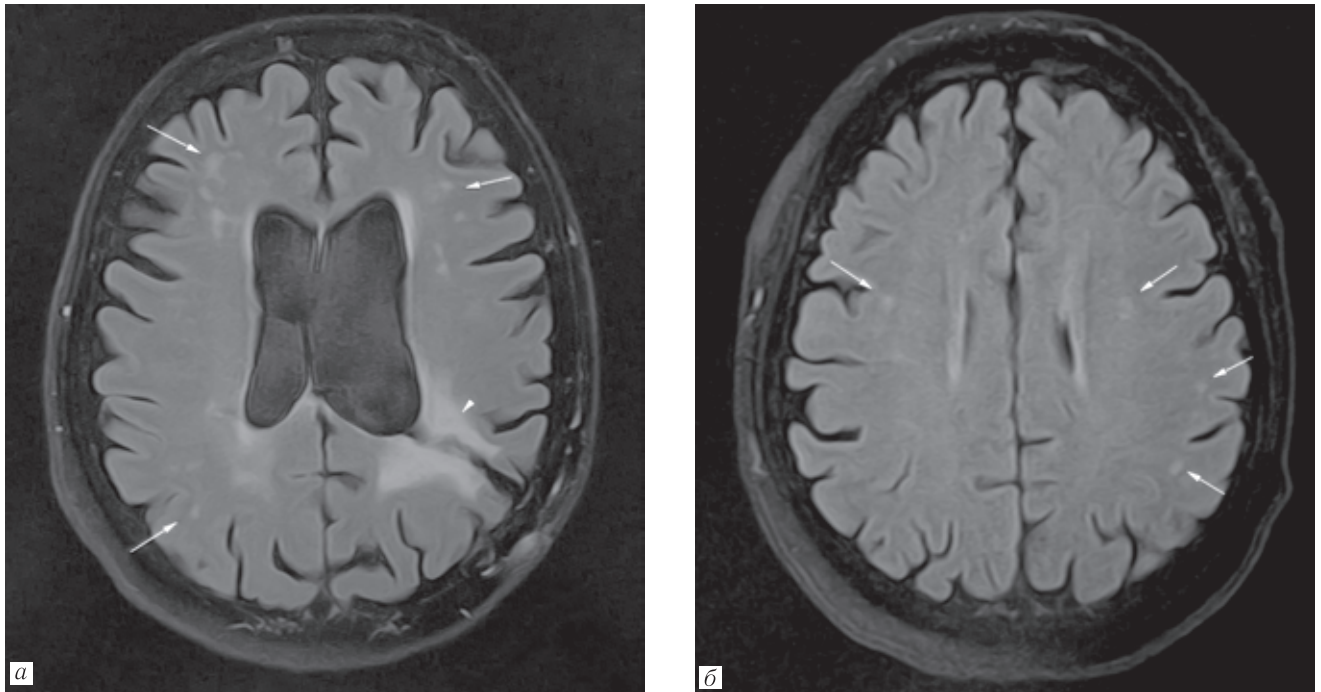


Рис. 1. МР-томограммы головного мозга разных пациентов с ложноположительным заключением при использовании предложенного алгоритма: *a, б* — T2-ВИ FLAIR с подавлением сигнала от жира (FatSat) в аксиальной плоскости. Определяются многоочаговые поражения обеих гемисфер головного мозга, не характерные для рассеянного склероза (стрелки). Последствия вентрикулоперитонеального шунтирования (наконечник стрелки)

Fig. 1. Brain MRI scans of different patients with a false-positive conclusion when using the proposed algorithm: *a, б* — axial T2-WI, FLAIR, FatSat. Multi-focal lesions of both hemispheres of the brain not characteristic of multiple sclerosis (arrows) are detected. Ventriculoperitoneal shunt complications (arrowhead)

— для лиц с РС — 34 года (диапазон 23,6–44,6 или 19–51 год);

— для лиц без РС — 33,5 года (диапазон 25,2–41,8 года) и 36,5 лет (диапазон 23–57 лет).

А вот в исследовании со специфичностью 88,6% средний возраст приближался к значениям наших пациентов и составлял 45 лет с диапазоном 30–60 лет [21, с. 170]. Таким образом, на снижение спе-

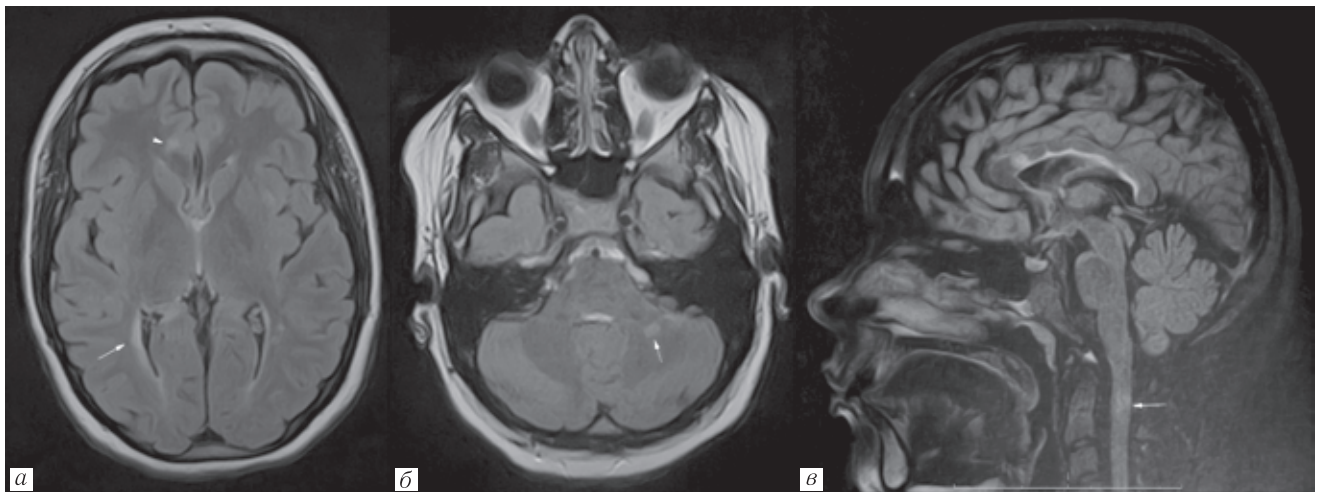


Рис. 2. МР-томограммы головного мозга разных пациентов с истинно положительным заключением при использовании предложенного алгоритма: *a, б* — T2-ВИ FLAIR в аксиальной плоскости; *в* — T2-ВИ FLAIR с подавлением сигнала от жира (FatSat) в сагиттальной плоскости. Отмечаются характерные для рассеянного склероза очаговые изменения в головном мозге, в том числе с локализацией в юстакортикальных отделах (*a* — головка стрелки), перивентрикулярных отделах (*a* — стрелка), левой гемисфере мозжечка (*б* — стрелка), спинном мозге (*в* — стрелка)

Fig. 2. Brain MRI scans of different patients with a true-positive conclusion when using the proposed algorithm: *a, б* — axial T2-WI, FLAIR, FatSat; *в* — sagittal T2-WI, FLAIR, FatSat. Focal brain changes characteristic of multiple sclerosis are detected, including those localized in juxtacortical areas (*a* — arrowhead), periventricular areas (*a* — arrow), left cerebellar hemisphere (*б* — arrow), and the spinal cord (*в* — arrow)

Таблица 2

Характеристики диагностической точности индекс-теста при оптимальной величине порога активации $\geq 99,87\%$

Table 2

Diagnostic accuracy parameters of the index test at an optimal cut-off value of $\geq 99,87\%$

| Показатель | Значение (среднее, 95% ДИ) |
|--|----------------------------|
| Чувствительность | 1,000 (0,398; 1,000) |
| Специфичность | 0,753 (0,650; 0,838) |
| Точность (общая валидность) | 0,763 (0,664; 0,845) |
| Отношение правдоподобия положительного результата | 4,0 (1,1; 6,2) |
| Отношение правдоподобия отрицательного результата | 0,00 (0,00; 0,93) |
| Прогностическая ценность положительного результата | 0,154 (0,044; 0,349) |
| Прогностическая ценность отрицательного результата | 1,000 (0,946; 1,000) |
| Площадь под характеристической кривой | 0,861 (0,747; 0,975) |

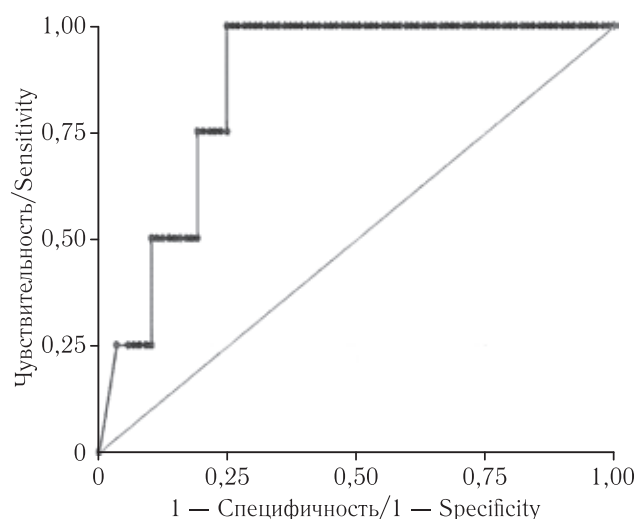


Рис. 3. Характеристическая кривая для оценки работы индекс-теста (величина оптимального порога активации («cut-off» — $\geq 99,87$)

Fig. 3. ROC curve evaluating the performance of the index test (optimal cut-off value $\geq 99,87$)

ваний [19, 22]. Именно их результаты отличаются более низкими уровнями достигнутых значений чувствительности.

Полученное нами значение площади под характеристической кривой (0,861) сопоставимо с данными литературы (0,880) [21].

В целом алгоритм ИИ обеспечивает эффективную сортировку МР-исследований в условиях первичного звена здравоохранения с поддержанием оптимального уровня настороженности относительно рассеянного склероза.

Ограничения. С учетом технических особенностей работы алгоритма и наличия отдельной рабочей станции, не интегрированной с Единым радиологическим информационным сервисом, не проводился хронометраж.

Заключение. Результатом работы стала разработка алгоритма ИИ для выявления рассеянного склероза на магнитно-резонансных томограммах в условиях типовой городской поликлиники, который обес-

Таблица 3

Сравнение характеристик диагностической точности индекс-теста с данными литературы

Table 3

Comparison of diagnostic accuracy parameters of the index test with literature data

| Показатель | Собственные данные | Gros et al., 2019 [19] | Wang et al., 2018 [20] | Yoo et al., 2017 [21] | Valverde et al., 2017 [22] | Hackmack et al., 2012 [23] |
|--|--------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Чувствительность | 100,0 | 83,0 | 98,77 | 87,3 | 68,2; 77,0* | 92,68 |
| Специфичность | 75,3 | — | 98,76 | 88,6 | — | 96,15 |
| Точность (общая валидность) | 76,3 | — | 98,77 | 87,9 | — | 94,42 |
| Прогностическая ценность положительного результата | 15,4 | 77,0 | 98,75 | — | 70,3; 73,0* | — |

Примечание. Прочерк означает, что в оригинальной статье не приведены значения соответствующего показателя. * Оценка алгоритма проводилась на двух независимых наборах данных.

Note: a dash indicate that in the original article there were not given the values of the appropriate index. * — the evaluation of the algorithm was performed on two independent data sets.

цифичности алгоритмов ИИ для выявления РС влияет возраст пациентов.

Следует отметить, что только две группы авторов проводили тестирование алгоритмов на независимых выборках в условиях многоцентровых исследо-

вания. Алгоритм ИИ обеспечивает эффективную сортировку МР-исследований в условиях первичного звена здравоохранения с поддержанием оптимального уровня настороженности относительно рассеянного склероза. Проведена валидация диагностической точности

алгоритма ИИ, при этом чувствительность метода составила 100,0, специфичность — 75,3, точность — 76,3, площадь под характеристической кривой — 0,861. Уровень прогностической ценности отрицательного результата составил 100%, что свидетельствует о надежном «отсевании» алгоритмом результатов исследований без признаков рассеянного склероза. Сопоставление полученных значений с собственными предыдущими результатами и данными литературы свидетельствует о достаточном качестве и отличной воспроизводимости результатов работы

алгоритма на независимых данных. Потенциально программное обеспечение на основе оригинального алгоритма ИИ можно отнести к классу 2а (программное обеспечение со средней степенью риска), так как предоставляемая им информация может явиться определяющей для принятия решения о назначении комплекса дополнительных исследований. Рекомендуется расширенная клиническая апробация алгоритма в условиях медицинской организации первичного звена, оказывающей амбулаторно-поликлиническую медицинскую помощь.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Ханов Е.В., Рождественский А.С., Кудрявцева Е.А. Исследование наследственных факторов предрасположенности к рассеянному склерозу и особенностей его течения в русской этнической группе // *Бюллетень Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2011. Т. 31, № 1. С. 113–118. [Hanoh E.V., Rozhdestvenskij A.S., Kudryavceva E.A. [Research on hereditary factors of multiple sclerosis susceptibility and peculiarities of its course in russian ethnic group. *The Bulletin of Siberian Branch of Russian Academy of Medical Science*, 2011, Vol. 31, No. 1, pp. 113–118 (In Russ.)].
2. Atlas of MS 2013. Multiple Sclerosis International Federation, 2013. 28 p.
3. Шмидт Т.Е., Яхно Н.Н. *Рассеянный склероз: воспаление, дегенерация: руководство для врачей*. 3-е изд. М.: МЕДпресс-информ, 2012. 272 с. [Schmidt T.E., Yahno N.N. *Multiple sclerosis: inflammation, degeneration: guidelines for clinicians*. 3rd ed. Moscow: MEDpress-inform, 2012, 272 p. (In Russ.)].
4. Karussis D. The diagnosis of multiple sclerosis and the various related demyelinating syndromes: a critical review // *J. Autoimmun.* 2014. Feb-Mar. Vol. 48–49. P. 134–142. doi: 10.1016/j.jaut.2014.01.022.
5. Guillemin F., Baumann C., Epstein J. LORSEP Group. Older Age at Multiple Sclerosis Onset Is an Independent Factor of Poor Prognosis: A Population-Based Cohort Study // *Neuroepidemiology*. 2017. No. 48 (3–4). P. 179–187. doi: 10.1159/000479516.
6. Gelfand J.M. Multiple sclerosis: diagnosis, differential diagnosis, and clinical presentation // *Handb Clin Neurol*. 2014. No 122. P. 269–290. doi: 10.1016/B978-0-444-52001-2.00011-X.
7. Брюхов В.В., Кротенкова И.А., Морозова С.Н. Современный взгляд на МРТ-диагностику рассеянного склероза: обновленные МРТ-критерии 2016 г. // *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2017. Т. 117, № 2–2. С. 66–73. [Bryuhov V.V., Krotchenkova I.A., Morozova S.N. A current view on the MRI diagnosis of multiple sclerosis: an update of 2016 revised MRI criteria. *S.S. Korsakov journal of neurology and psychiatry*, 2017, Vol. 117, No. 2–2, pp. 66–73 (In Russ.)].
8. Гомболевский В.А., Лайпан А.Ш., Шапиев А.Н. *Применение критериев диагностики и контроля рассеянного склероза по MAGNIMS*. М., 2018. Вып. 11. 12 с. (Серия: «Лучшие практики лучевой и инструментальной диагностики»). [Gomboleviskij V.A., Lajpan A.Sh., Shapiev A.N. *MAGNIMS diagnosis and control criteria use in multiple sclerosis*. Moscow, 2018; Issue 11. 12 p. (Series «Best practices in imaging and instrumental diagnostics») (In Russ.)].
9. Захарова М.Н., Абрамова А.А., Аскаророва Л.Ш. *Рассеянный склероз: вопросы диагностики и лечения*. М.: Медиа-Менте, 2018. 240 с. [Zaharova M.N., Abramova A.A., Askarova L.Sh. et al. *Multiple sclerosis: diagnosis and treatment issues*. Moscow: MediaMente, 2018, 240 p. (In Russ.)].
10. Гусев А.В., Плисс М.А. Основные рекомендации к созданию и развитию информационных систем в здравоохранении на базе искусственного интеллекта // *Врач и информационные технологии*. 2018. № 3. С. 45–60. [Gusev A.V., Pliss M.A. The basic recommendations for the creation and development of information systems in health care based on artificial intelligence. *Information technologies for the physician*, 2018, No. 3, pp. 45–60 (In Russ.)].
11. Морозов С.П., Владимирский А.В., Гомболевский В.А., Кузьмина Е.С., Ледихова Н.В. Искусственный интеллект: автоматизированный анализ текста на естественном языке для аудита радиологических исследований // *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2018. Т. 99, № 5. С. 253–258. [Morozov S.P., Vladimirskij A.V., Gomboleviskij V.A., Kuz'mina E.S., Ledihova N.V. Artificial intelligence: natural language processing for peer-review in radiology. *Journal of radiology and nuclear medicine*, 2018, Vol. 99, No. 5, pp. 253–258 (In Russ.)].
12. Arani L.A., Hosseini A., Asadi F. Intelligent Computer Systems for Multiple Sclerosis Diagnosis: a Systematic Review of Reasoning Techniques and Methods // *Acta Inform Med*. 2018. Dec. 26 (4). P. 258–264. doi: 10.5455/aim.2018.26:258-264.
13. Ranschaert E.R., Morozov S.P., Algra P.R. *Artificial intelligence in medical imaging*. Springer International Publishing, 2019. 369 p.
14. Solomon A.J., Naismith R.T., Cross A.H. Misdiagnosis of multiple sclerosis: Impact of the 2017 McDonald criteria on clinical practice // *Neurology*. 2019. Jan 1. Vol. 92, No. 1. P. 26–33. doi: 10.1212/WNL.0000000000006583.
15. Морозов С.П., Владимирский А.В., Кляшторный В.Г., Андрейченко А.Е., Кульберг Н.С., Гомболевский В.А., Сергунова К.А. *Клинические испытания программного обеспечения на основе интеллектуальных технологий (лучевая диагностика)*. М., 2019. Вып. 57. 33 с. (Серия «Лучшие практики лучевой и инструментальной диагностики») [Morozov S.P., Vladzimirskiy A.V., Klyashornyy V.G., Andreychenko A.E., Kul'berg N.S., Gomboleviskij V.A., Serguniva K.A. *Clinical studies of intelligence technology-based software (radiology)*. Moscow, 2019, Issue 57, 33 p. (Series «Best practices in imaging and instrumental diagnostics») (In Russ.)].
16. Morozov S.P., Vladzimirskiy A.V., Klyashornyy V.G. *Clinical acceptance of software based on artificial intelligence technologies (radiology)*. М., 2019, Issue 57, 51 p. (Series «Best practices in medical imaging»). arXiv: 1908.00381.
17. Avants B.B., Tustison N., Song G. Advanced normalization tools (ANTS) // *Insight j*. 2009. Jun 4. No. 2. P. 1–35.
18. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016. P. 770–778.
19. Gros C., De Leener B., Badji A. Automatic segmentation of the spinal cord and intramedullary multiple sclerosis lesions with convolutional neural networks // *Neuroimage*. 2019. Jan 1. No. 184. P. 901–915. doi: 10.1016/j.neuroimage.2018.09.081.
20. Wang S.H., Tang C., Sun J. Multiple Sclerosis Identification by 14-Layer Convolutional Neural Network With Batch Normalization, Dropout, and Stochastic Pooling // *Front Neurosci*. 2018. Nov. 8. P. 812–818. doi: 10.3389/fnins.2018.00818.
21. Yoo Y., Tang L.Y.W., Brosch T. Deep learning of joint myelin and T1w MRI features in normal-appearing brain tissue to distinguish between multiple sclerosis patients and healthy controls // *Neuroimage Clin*. 2017. Oct. 14. No. 17. P. 169–178. doi: 10.1016/j.nicl.2017.10.015.
22. Valverde S., Cabezas M., Roura E. Improving automated multiple sclerosis lesion segmentation with a cascaded 3D convolutional neural network approach // *Neuroimage*. 2017. Jul 15. No. 155. P. 159–168. doi: 10.1016/j.neuroimage.2017.04.034.
23. Hackmack K., Paul F., Weygandt M. Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative. Multi-scale classification of disease using structural MRI and wavelet transform // *Neuroimage*. 2012. Aug 1. No. 62 (1). P. 48–58. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.05.022.

Поступила в редакцию/Received by the Editor: 17.03.2020 г.

Авторский вклад:

Вклад в концепцию и план исследования — С.П.Морозов, А.В.Владимирский. Вклад в сбор данных — Г.Н.Черняева, А.В.Бажин, А.А.Лимкин, Т.Н.Горшкова, Н.С.Курочкина, С.Ф.Якушева. Вклад в анализ данных и выводы — Г.Н.Черняева, М.Г.Беллев, В.Г.Кляшторный. Вклад в подготовку рукописи — Г.Н.Черняева.

Сведения об авторах:

Морозов Сергей Павлович — доктор медицинских наук, профессор, директор, государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 109029, Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1; e-mail: morozov@prcmg.ru; SPIN: 8542–1720; ORCID: 0000–0001–6545–6170;

Владимирский Антон Вячеславович — доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе, государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 109029, Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1; e-mail: a.vladimirsky@prcmg.ru; SPIN: 3602–7120; ORCID: 0000–0002–2990–7736;

Черняева Галина Николаевна — младший научный сотрудник, государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 109029, Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1; врач-рентгенолог, заведующий рентгенологическим отделением, закрытое акционерное общество «Медицинский центр в Коломенском»; 115533, Москва, ул. Высокая, д. 19, корп. 2; e-mail: chernyaeva_galin@inbox.ru;

Бажин Александр Владимирович — кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог, государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 109029, Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1; врач-рентгенолог, государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Городская поликлиника № 2 Департамента здравоохранения города Москвы»; 117556, Москва, Фруктовая ул., д. 12; e-mail: avbazhin@yandex.ru; SPIN: 6122–5786; ORCID: 0000–0003–3198–1334;

Кляшторный Владислав Георгиевич — кандидат биологических наук, статистик, государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 109029, Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1; e-mail: v.klyashorny@prcmg.ru; SPIN: 3918–9762; ORCID: 0000–0001–7385–5032;

Горшкова Тамара Николаевна — государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 109029, Москва, Средняя Калитниковская ул., д. 28, стр. 1; e-mail: tamara.gorsh@yandex.ru;

Беляев Михаил Геннадьевич — кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»; 121205, Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30, стр. 1; e-mail: M.Belyaev@skoltech.ru; SPIN: 2406–1772; ORCID: 0000–0001–9906–6453;

Пимкин Артем Александрович — младший инженер-исследователь, автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»; 121205, Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30, стр. 1; e-mail: M.Belyaev@skoltech.ru; ORCID: 0000–0003–1164–1826;

Курочкина Надежда Сергеевна — инженер-исследователь, автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»; 121205, Москва, территория Инновационного центра «Сколково»; Большой бульвар, д. 30, стр. 1; e-mail: M.Belyaev@skoltech.ru;

Якушева Софья Федоровна — студентка, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»; 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; e-mail: M.Belyaev@skoltech.ru.

Открыта подписка на 2-е полугодие 2020 года.

Подписные индексы:

Агентство «Роспечать» 57991

ООО «Агентство „Книга-Сервис”» 42177