

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2021
УДК 616.831-001.34

Ахадов Т.А., Зайцева Е.С., Маматкулов А.Д., Божко О.В., Мельников И.А., Семенова Н.А., Валиуллина С.А., Манжурцев А.В., Ублинский М.В., Демина А.Н., Хусаинова Д.Н., Дмитренко Д.М., Ахлебинина М.И., Костикова Т.Д., Меньщиков П.Е.

Диагностические возможности изображений, взвешенных по магнитной восприимчивости, при черепно-мозговой травме у детей

ГБУЗ «НИИ неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы», 119180, Москва, Россия

Введение. При магнитно-резонансной томографии (МРТ) для получения изображений, взвешенных по неоднородности магнитного поля (SWI), используют разницу в чувствительности между тканями и применяют 3D-радиочастотное градиентное эхо-сканирование высокого разрешения с полной компенсацией скорости.

Цель: определить особенности поражений, вызванных черепно-мозговой травмой (ЧМТ) у детей, с помощью последовательности SWI.

Материалы и методы. Обследовано 535 детей в возрасте от 2 мес до 18 лет (средний возраст $9,58 \pm 1,5$ года) с ЧМТ. Мальчиков было 325 (60,7%), девочек — 210 (39,3%). МРТ без и с внутривенным контрастированием проводили на томографе «Philips Achieva» 3 T с получением T1- и T2-ВИ, 2D- и 3D-изображений. Методики FLAIR, магнитно-резонансной ангиографии, SWI, диффузионно-взвешенных/диффузионно-тензорных изображений, магнитно-резонансной спектроскопии и функциональной МРТ использовали для визуализации диффузного аксонального повреждения.

Результаты. Детей с тяжелой ЧМТ было 178 (33,3%), с ЧМТ средней степени — 172 (32,1%), с легкой ЧМТ — 185 (34,6%). Из 535 пострадавших детей у 129 (24,1%) МРТ была выполнена в первые 24 ч от момента травмы, у 91 (17,0%) — до 48 ч, у 78 (14,6%) — до 72 ч, у 237 (44,3%) — до 13 сут. Очаги диффузного аксонального повреждения при всех степенях ЧМТ выявлены у 422 (78,9%) детей.

Заключение. SWI является чувствительным методом диагностики поражений головного мозга при ЧМТ, который обеспечивает значимый вклад в прогнозирование исходов травмы на начальных этапах. Объем поражения головного мозга, диагностированный с помощью SWI, коррелирует со степенью травмы по шкале комы Глазго. Использование SWI позволяет определять связи между локальными поражениями мозга и формированием когнитивных дефицитов, потенциально предоставляя возможность применять SWI в гиперострой фазе.

Ключевые слова: дети; диффузные аксональные повреждения; магнитно-резонансная томография; неоднородность магнитного поля; черепно-мозговая травма

Для цитирования: Ахадов Т.А., Зайцева Е.С., Маматкулов А.Д., Божко О.В., Мельников И.А., Семенова Н.А., Валиуллина С.А., Манжурцев А.В., Ублинский М.В., Демина А.Н., Хусаинова Д.Н., Дмитренко Д.М., Ахлебинина М.И., Костикова Т.Д., Меньщиков П.Е. Диагностические возможности изображений, взвешенных по магнитной восприимчивости, при черепно-мозговой травме у детей. *Российский педиатрический журнал*. 2021; 24(5): 311–316. <https://doi.org/10.46563/1560-9561-2021-24-5-311-316>

Для корреспонденции: Ублинский Максим Вадимович, канд. биол. наук, науч. сотр. НИИ НДХиТ, maхublinsk@mail.ru

Участие авторов: Ахадов Т.А., Семенова Н.А., Мельников И.А., Валиуллина С.А. — концепция и дизайн исследования; Божко О.В., Зайцева Е.С., Ахлебинина М.И., Демина А.Н., Дмитренко Д.М., Костикова Т.Д., Маматкулов А.Д. — сбор и обработка материала; Ублинский М.В., Хусаинова Д.Н., Манжурцев А.В., Меньщиков П.Е. — статистическая обработка; Ахадов Т.А. — написание текста, редактирование; Ахадов Т.А., Мельников И.А., Валиуллина С.А. — утверждение окончательного варианта статьи. Ответственность за целостность всех частей статьи — все соавторы.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 16.08.2021
Принята в печать 28.10.2021
Опубликована 15.11.2021

Tolibdzhon A. Akhadov, Ekaterina S. Zaytseva, Alisher D. Mamatkulov, Olga V. Bozhko, Ilya A. Melnikov, Nataliya A. Semenova, Svetlana A. Valiullina, Andrey V. Manzhurtsev, Maxim V. Ublinskiy, Anna N. Demina, Darya N. Khusainova, Dmitry M. Dmitrenko, Mariya I. Akhlebinina, Tatyana D. Kostikova, Petr E. Menshchikov

Diagnostic capabilities of magnetic susceptibility-weighted images in traumatic brain injury in children

Clinical and Research Institute of Emergency Pediatric Surgery and Trauma, Moscow, 119180, Russian Federation

Introduction. In MRI, the difference in sensitivity between tissues is used to obtain images weighted by the inhomogeneity of the magnetic field termed susceptibility-weighted imaging (SWI) and a high-resolution 3D radiofrequency gradient echo scan with full speed compensation is applied. **The aim was** to determine the features of lesions caused by traumatic brain injury in children using the SWI sequence.

Materials and methods. 535 TBI children aged two months up to 18 years old (average age 9.58 ± 1.5) were studied. There were 325 boys (60.7%), 210 girls (39.3%). MRI was performed without and with intravenous contrast on a Phillips Achieva 3 T scanner with T1- and T2WI, 2D and 3D images, FLAIR, magnetic resonance angiography (TOF MRA), SWI, and DW/DTI, MRS and fMRI, SWI were used for visualization of DAI.

Results. Patients included children with severe TBI — 178 (33.3%), moderate TBI — 172 (32.1%) and mild TBI — 185 (34.6%). Of the 535 injured children, 129 (24.1%) had MRI performed within the first 24 hours from the moment of injury, up to 48 hours — at 91 (17.0%), up to 72 hours — in 78 (14.6%) and up to 13 days — in 237 (44.3%). DAI foci at all degrees of TBI were detected in 422 (78.9%) children out of 535 children.

Conclusion. SWI is a sensitive method for diagnosing brain lesions in TBI and significantly contributes to predicting outcomes in the early stages after trauma. The amount of brain lesions diagnosed by SWI correlates with the degree of injury according to the Glasgow Coma Scale. The study of the brain functional connections can inform about possible relationships between the localization of the SWI lesion and cognitive deficits, potentially providing an opportunity to use SWI in the hyperacute phase.

Keywords: children; diffuse axonal injuries; MRI; SWI; traumatic brain injury

For citation: Akhadov T.A., Zaytseva E.S., Mamatkulov A.D., Bozhko O.V., Melnikov I.A., Semenova N.A., Valiullina S.A., Manzhurtsev A.V., Ublinskiy M.V., Demina A.N., Khusainova D.N., Dmitrenko D.M., Akhlebinina M.I., Kostikova T.D., Menshchikov P.E. Diagnostic capabilities of magnetic susceptibility-weighted images in traumatic brain injury in children. *Rossiyskiy pediatricheskiy zhurnal (Russian Pediatric Journal)*. 2021; 24(5): 311–316. (in Russian). <https://doi.org/10.46563/1560-9561-2021-24-5-311-316>

For correspondence: Maxim V. Ublinskiy, MD, radiologist, researcher, Clinical and Research Institute of Emergency Pediatric Surgery and Trauma, Moscow, 119180, Russian Federation, maxublinsk@mail.ru

Contribution: Akhadov T.A., Semenova N.A., Melnikov I.A., Valiullina S.A. — research concept and design; Bozhko O.V., Zaytseva E.S., Akhlebinina M.I., Demina A.N., Dmitrenko D.M., Kostikova T.D., Mamatkulov A.D. — collection and analysis of data; Ublinskiy M.V., Khusainova D.N., Manzhurtsev A.V., Menshchikov P.E. — statistical analysis; Akhadov T.A. — writing text; Akhadov T.A. — editing; Akhadov T.A., Melnikov I.A., Valiullina S.A. — approval of the final version of the article. Akhadov T.A. — responsibility for the integrity of all parts of the article.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Information about the authors:

Melnikov I.A., <https://orcid.org/0000-0002-2910-3711>
Semenova N.A., <https://orcid.org/0000-0001-6641-0668>
Valiullina S.A., <https://orcid.org/0000-0002-1622-0169>
Ublinskiy M.V., <https://orcid.org/0000-0002-4627-9874>
Akhlebinina M.I., <https://orcid.org/0000-0001-9862-3609>

Received: August 16, 2021
Accepted: October 28, 2021
Published: November 15, 2021

Введение

Импульсная последовательность изображений, взвешенных по магнитной восприимчивости (SWI), была впервые описана в 2004 г. [1]. Это модифицированная трёхмерная методика получения взвешенных по T2* изображений (T2*-ВИ) в импульсной последовательности градиентного эха (GRE) с постобработкой. Методика позволяет улучшить обнаружение парамагнитных продуктов трансформации крови на основе эффектов их магнитной восприимчивости, связанных с дисперсией фазы, вызванной присутствием внесосудистого дезоксигемоглобина и метгемоглобина [2, 3]. Разные производители используют свои названия для данной последовательности (susceptibility weighted angiography, SWAN — «GE»; susceptibility weighted imaging, SWI — «Siemens»; venous blood oxygen dependent, VenBOLD — «Philips»; flow sensitive black blood, FSBB — «Toshiba» и др.). SWI в 3–6 раз чувствительнее, чем классические T2*-ВИ или любые другие виды последовательностей, в выявлении мелких кровоизлияний, которые являются основным критерием постановки диагноза диффузного аксонального повреждения (ДАП). Более 25% пациентов, поступивших в травматологические центры с сотрясением головного мозга, имели травматические микрокровоизлияния. Пострадавшие, у которых были травматические микрокровоизлияния, выявленные при МРТ, в 2 раза чаще становились инвалидами после ЧМТ [4].

Количество, распространение и объём геморрагических очагов, выявленных с помощью SWI, тесно коррелировали с переменными клинического исхода, включая оценку по шкале комы Глазго (ШКГ), хирургическое

вмешательство, продолжительность пребывания в реанимационном отделении и длительность интубации, а также с интеллектуальными нарушениями. В связи с корреляциями между количеством и распространением геморрагических очагов, объёмом поражения мозговой ткани, выявленных с помощью SWI, и нарушениями сознания возможно прогнозирование клинического исхода [4–6]. В последнее время с повышением частоты и тяжести ЧМТ у детей значительно увеличилась распространённость и потребность в SWI.

Цель: оценить поражения, вызванные ЧМТ, с помощью последовательности SWI.

Материалы и методы

Комплексно обследовано 535 детей с ЧМТ различной степени тяжести по ШКГ (15–3 балла). Мальчиков было 325 (60,7%), девочек — 210 (39,3%). Возраст пациентов — от 2 мес до 18 лет (средний возраст $9,58 \pm 1,5$ года). Детей с тяжелой ЧМТ было 178 (33,3%), с ЧМТ средней степени тяжести — 172 (32,1%), с лёгкой ЧМТ — 185 (34,6%). За 5 лет суммарная летальность среди детей с тяжёлой ЧМТ ($n = 178$) составила 8,98% ($n = 16$).

МРТ, в том числе с внутривенным контрастированием, была проведена всем пациентам на томографе «Philips Achieva» 3 Т с получением мультипланарных T1- и T2-ВИ, 2D- и 3D-изотропных изображений, FLAIR, магнитно-резонансной ангиографии, SWI, диффузионно-взвешенных/диффузионно-тензорных изображений, магнитно-резонансной спектроскопии и функциональной МРТ. T2-ВИ спин-эхо и FLAIR были основополагающими для обнаружения анатомических

повреждений, отёка и субарахноидальных или внутрижелудочковых кровоизлияний, возникающих в результате дислокационных и компрессионных изменений головного мозга после ЧМТ. Для визуализации ДАП использовали методику SWI.

Все полученные данные обработаны статистически с использованием программы «Statistica 6.1». Исследование проводилось в соответствии с этическими принципами проведения медицинских исследований с участием человека в качестве субъектов (Хельсинская декларация Всемирной медицинской ассоциации). Все испытуемые (если их возраст на момент исследования достиг 15 лет) или их законные представители подписывали добровольное информированное согласие на участие в исследовании. Тема одобрена локальным этическим комитетом.

Результаты

Самой частой причиной тяжёлой ЧМТ были ДТП ($n = 103$; 58%), затем следуют кататравма ($n = 40$; 22,6%) и другие повреждения ($n = 35$; 19,4%). Поступили в институт в пределах 72 ч после получения ЧМТ 303 (56,6%) пациента. Из 535 пострадавших детей у 129 (24,1%) МРТ была выполнена в первые 24 ч от момента травмы, у 91 (17%) — до 48 ч, у 78 (14,6%) — до 72 ч, у 237 (44,3%) — до 13 сут.

Визуальная картина травматических повреждений (ушиб, внутримозговая, эпи- и субдуральная гематомы) при структурной МРТ на T1-, T2-ВИ и FLAIR имела типичную семиотику.

При анализе данных нашей выборки очаги ДАП по частоте располагались в порядке убывания в лобных, височных, теменных и затылочных долях, мозолистом теле, скорлупе и бледном шаре, таламусе, ножках головного мозга и покрышке среднего мозга, варолиевом мосту и продолговатом мозге, мозжечке.

Анализ изменений SWI выявил у 422 (78,9%) травмированных детей точечные травматические микрокровоизлияния (ДАП): у 103 (56%) из 185 пациентов с лёгкой ЧМТ (включая сотрясение головного мозга); у 146 (84,9%) из 172 пациентов с ЧМТ средней степени тяжести; у 173 (97,2%) из 178 пациентов с тяжёлой ЧМТ.

Распределение пациентов по типам ДАП в зависимости от тяжести ЧМТ было следующим: при лёгкой ЧМТ из 103 пациентов с очагами у 96 (93,5%) было

ДАП I, у 7 (6,5%) — ДАП II; при ЧМТ средней степени тяжести из 146 травмированных с очагами у 79 (54,0%) имелось ДАП I, у 56 (38,4%) — ДАП II, у 11 (7,6%) — ДАП III; из 178 пациентов с тяжёлой ЧМТ с очагами у 20 (11,6%) было ДАП I, у 97 (56,0%) — ДАП II и 56 (32,4%) — ДАП III.

У пациентов с лёгкой ЧМТ зачастую единственными патологическими изменениями были очаги диффузного аксонального повреждения (ДАП I) в больших полушариях мозга на границе серого и белого вещества (рис. 1).

При ДАП II очаги диффузного аксиального повреждения определялись в мозолистом теле (рис. 2), при ДАП III — в стволе мозга (рис. 3).

Очаги ДАП по частоте располагались в порядке убывания в лобных, височных, теменных и затылочных долях, мозолистом теле, скорлупе и бледном шаре, таламусе, ножках головного мозга и покрышке среднего мозга, мосте и продолговатом мозге. Пациенты с ДАП II и ДАП III в 2 раза чаще имели инвалидность через 30 и 90 дней после ЧМТ, а 25 (14%) из 178 пациентов с тяжёлой ЧМТ, имевших ДАП II и ДАП III, оставались через 1 год в вегетативном состоянии.

Обсуждение

Установленные нами закономерности свидетельствуют о том, что ДАП не являются исключительными повреждениями мозга при средней или тяжёлой ЧМТ, они могут быть и при лёгкой ЧМТ. ДАП выявлены нами в 78,9% случаев. Это согласуется с другими исследованиями, демонстрирующими положительную связь между распространённостью ДАП и тяжестью травм [4–8]. При этом было выявлено, что ДАП ассоциированы в основном с тяжёлой травмой и, соответственно, с худшими клиническими исходами [2, 7, 9, 10].

Нами показано также, что T1-ВИ необходимы для топической локализации ДАП, однако негеморрагические очаги чаще могут быть изоинтенсивными по отношению к окружающим тканям. Геморрагические очаги проявляются гиперинтенсивным сигналом на T1-ВИ. В то же время на T2-ВИ SE и FLAIR негеморрагические повреждения мозга проявляются слабо выраженными гиперинтенсивными сигналами. Типичной МРТ-картиной ДАП является наличие множественных очагов с гиперинтенсивным сигналом на T2-ВИ на границе серого и белого вещества лобных, височных или теменных до-

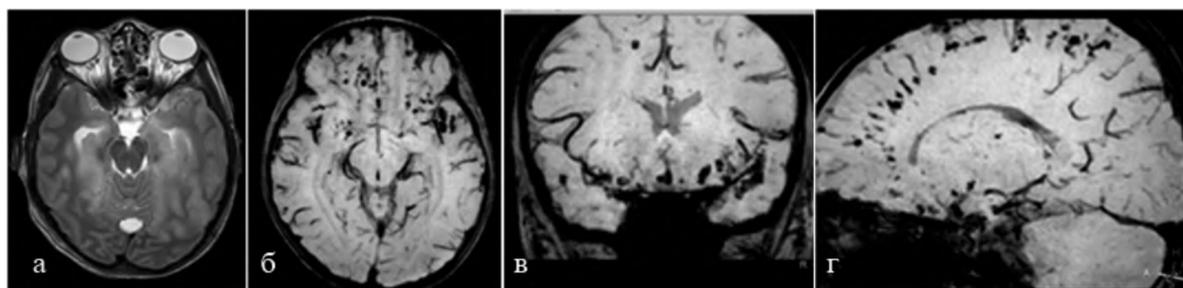


Рис. 1. МРТ головного мозга, аксиальная (а) T2-ВИ SE и SWI (б), корональная (в) и сагиттальная (г) проекции SWI.

Очаги ДАП I в белом веществе больших полушарий.

Fig. 1. MRI of the brain, axial (a) T2WI SE and SWI (b), coronal (c) and sagittal (d) SWI projections.

DAI I — foci of diffuse axonal damage in the white matter of the cerebral hemispheres.

лей или в мозолистом теле мозга. Другие области, которые часто поражаются, — это ростральный отдел ствола мозга и лучистая корона. T2*-ВИ GRE более информативны и полезны в выявлении парамагнитных эффектов точечных кровоизлияний. Они чаще и лучше выявляют изменения сигнала в патологических областях при ЧМТ,

которые кажутся нормальными на T1- и T2-ВИ SE. Поэтому долгое время T2*-ВИ GRE визуализация была основным типом изображений для пациентов с предполагаемыми ДАП при ЧМТ. Сигнальные изменения на GRE-изображениях могут сохраняться в течение многих лет после травмы.

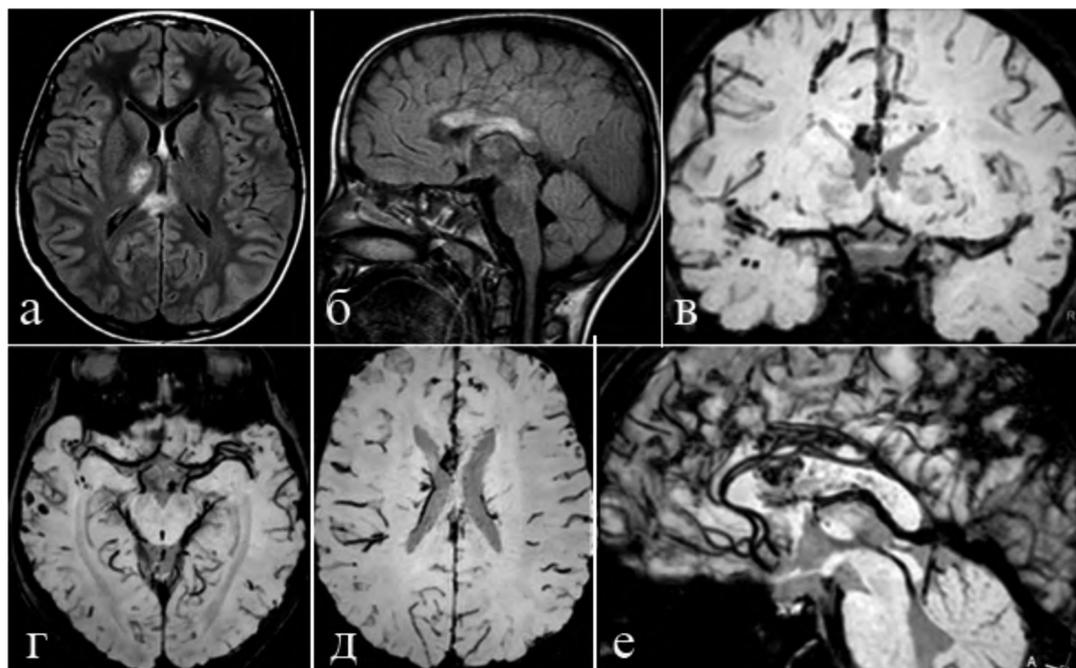


Рис. 2. МРТ головного мозга, аксиальная (а) и сагиттальная (б) проекции FLAIR, корональная (в), аксиальная (г, д) и сагиттальная (е) проекции SWI.

Очаги ДАП II в мозолистом теле, белом веществе больших полушарий.

Fig. 2. MRI of the brain, axial (a) and sagittal (b) FLAIR projections, coronal (c) axial (d, e) and sagittal (f) SWI projections.

DAI II — foci of diffuse axonal damage in the corpus callosum, the white matter of the cerebral hemispheres.

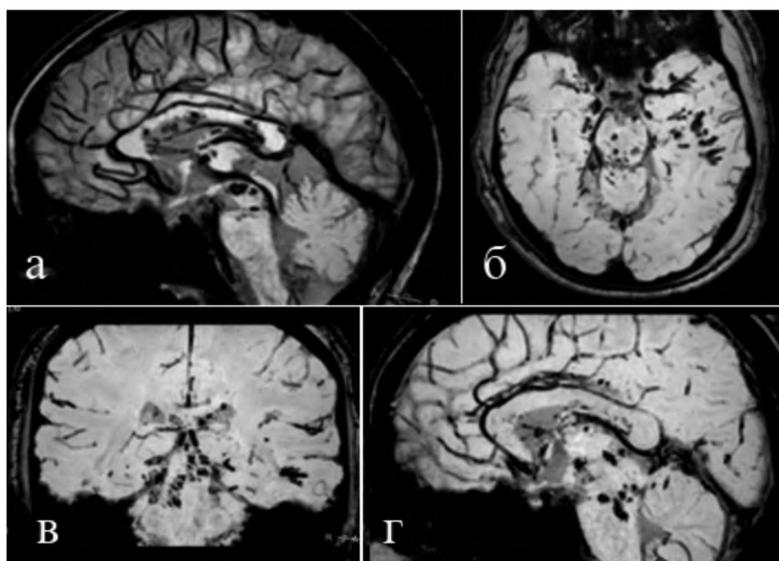


Рис. 3. МРТ головного мозга, сагиттальная проекция T2*-ВИ (а), аксиальная (б), корональная (в) и сагиттальная (г) проекции SWI.

Очаги ДАП III в стволе головного мозга, белом веществе больших полушарий.

Fig. 3. MRI of the brain, sagittal T2*WI (a), axial (b), coronal (c) and sagittal (d) SWI projections.

DAI III — foci of diffuse axonal damage in the brainstem, the white matter of the cerebral hemispheres.

Пациенты с ДАП имели более тяжёлую травму и более низкий уровень по ШКГ по сравнению с пациентами без ДАП. Этот вывод важен, потому что большинство исследований для выявления ДАП проводятся у больных с тяжёлой ЧМТ. Чтобы определить клинические последствия ДАП, были проанализированы переменные, предсказывающие плохой результат: тяжесть травмы, анатомические изменения при МРТ, продолжительность комы, время пребывания в реанимационных отделениях. Установлено, что очаги ДАП при ЧМТ являются значимым независимым предиктором исхода. Пациенты с признаками ДАП II и III при последующем наблюдении в 2 раза чаще имели инвалидность (GOSE 2–4). Другие исследователи обнаружили связь между повреждением и клиническим исходом после ЧМТ [11]. Посмертные патологические исследования пациентов с тяжёлой ЧМТ установили связи между прямыми повреждениями аксонов, не видимыми при нейровизуализации, и точечными микрокровоизлияниями, выявленными при SWI, особенно в мозолистом теле и инфратенториальных структурах [12]. Анализ данных импульсной последовательности SWI у пациентов в динамике от 48 ч до 14 дней после ЧМТ выявил слияние и видимый рост очагов ДАП в мозолистом теле, лучистой короне или подкорковом белом веществе при наличии неизменённых очагов. Со временем отмечалось уменьшение числа очагов, связанное с увеличением общего объёма очагов ДАП.

Таким образом, формирование микрокровоизлияний, связанных с ДАП, не ограничивается строго моментом травмы. Микрокровоизлияния могут увеличиваться по площади и количеству в острой фазе ЧМТ [4, 13]. Использование SWI позволило выявить дополнительные поражения мозга, связанные с ДАП, по сравнению с T2*-GRE МРТ в 30% случаев в течение 24 ч после травмы. Более тяжёлая ЧМТ (больше число очагов и объём ДАП, выявленный с помощью SWI) обычно ассоциировалась с интеллектуальными нарушениями, более серьёзными поведенческими проблемами и низким адаптивным функционированием. Продолжительность комы коррелировала с когнитивным и адаптивным профилями пациентов. Вербальные и/или двигательные нарушения с частичным нарушением когнитивных функций были выражены меньше при ЧМТ средней тяжести, чем при тяжёлой. Наличие микрокровоизлияний, выявленных SWI и связанных с ЧМТ, свидетельствует о нейропсихологическом дефекте функции краткосрочной памяти, что указывает на то, что наличие микрокровоизлияний может быть возможным биомаркером тяжести ЧМТ у детей. В итоге методика SWI может помочь в диагностике и оценке изменений при ЧМТ, когда этиология комы не ясна, а структурная МРТ головного мозга без значимых находок, и также может помочь в прогнозировании исходов, даже если выполняется в очень ранние сроки после тяжёлой ЧМТ у ребёнка.

До 14% пациентов после тяжёлой ЧМТ остаются в вегетативном состоянии через 1 год после травмы [6]. Микрокровоизлияния были связаны с инвалидностью независимо от других известных факторов риска, включая тяжесть общей травмы головного мозга, оценку по ШКГ, хирургическое вмешательство, продолжительность пребывания в реанимационном отделении, продолжительность интубации и повреждения, выявленные

при структурной МРТ [4, 14]. Установлено, что у пациентов после ЧМТ когнитивные показатели коррелируют с количеством и размером очагов ДАП [8]. Поражения располагались в порядке убывания частоты в лобных, височных, теменных и затылочных долях, мозолистом теле, скорлупе и бледном шаре, таламусе, ножках головного мозга и покрышке среднего мозга. Расстройства памяти соответствуют расположению очагов ДАП в височных долях и валике мозолистого тела. Прогноз у пациентов на ранней стадии средней и тяжёлой ЧМТ был лучше при ДАП, которые локализовались в белом веществе полушарий или мозолистом теле, чем у пациентов с ДАП с локализацией в стволовых структурах.

Поскольку объём микрокровоизлияний может изменяться между двумя временными точками, время сканирования МРТ следует учитывать при использовании SWI в качестве метода оценки тяжести травмы, потому что не только наличие посттравматических микрокровоизлияний в первые несколько часов после травмы, но и их развитие в последующие дни может быть важным для оценки степени тяжести и потенциального прогнозирования клинического исхода.

Заключение

SWI — это чувствительный метод для выявления поражений головного мозга при всех степенях тяжести ЧМТ, обеспечивающий значимый вклад в прогнозирование течения ЧМТ на её начальных этапах и может играть важную роль в прогнозировании продолжительности комы у больных с ДАП. Объём поражения белого вещества, диагностированный с помощью SWI, коррелирует со степенью травмы по ШКГ, а показатели когнитивных нарушений связаны с количеством и размером ДАП. Расстройства памяти соответствуют расположению очагов микрокровоизлияний, выявленных SWI, в височных долях и валике мозолистого тела. Изучение функциональных связей мозга после ЧМТ позволяет определять возможные корреляции между локализацией поражения SWI и когнитивными дефицитами, потенциально предоставляя возможность использовать SWI в гиперострой фазе травмы. Пострадавшие, имеющие микрокровоизлияния в паренхиме головного мозга после ЧМТ, в 2 раза чаще имеют инвалидность.

Литература

(п.п. 1-4; 6-9; 11-14 см. References)

5. Ахлебинина М.И., Мельников И.А., Ахадов Т.А. Алгоритм лучевой диагностики острой ЧМТ в неотложном стационаре. *Детская хирургия*. 2020; 24(S1): 17–25.
10. Ахадов Т.А., Семенова Н.А., Валиуллина С.А., Манжурцев А.В., Божко О.В., Мельников И.А. и др. Магнитно-резонансная томография в оценке тяжёлой черепно-мозговой травмы и прогноза восстановления головного мозга у детей. *Российский педиатрический журнал*. 2020; 23(5): 291–8. <https://doi.org/10.18821/1560-9561-2020-23-5-291-298>

References

1. Haacke E.M., Xu Y., Cheng Y.C.N., Reichenbach J.R. Susceptibility weighted imaging (SWI). *Magn. Reson. Med*. 2004; 52(3): 612–8. <https://doi.org/10.1002/mrm.20198>
2. Beauchamp M.H., Ditchfield M., Babl F.E., Kean M., Catroppa C., Yeates K.O., et al. Detecting traumatic brain lesions in children: CT versus MRI versus susceptibility weighted imaging (SWI).

- J. Neurotrauma*. 2011; 28(6): 915–27. <https://doi.org/10.1089/neu.2010.1712>
3. Geurts B.H.J., Andriessen T.M.J.C., Goraj B.M., Vos P.E. The reliability of magnetic resonance imaging in traumatic brain injury lesion detection. *Brain Inj*. 2012; 26(12): 1439–50. <https://doi.org/10.3109/02699052.2012.694563>
 4. Griffin A.D., Turtzo L.C., Parikh G.Y., Tolpygo A., Lodato Z., Moses A.D., et al. Traumatic microbleeds suggest vascular injury and predict disability in traumatic brain injury. *Brain*. 2019; 142(11): 3550–64. <https://doi.org/10.1093/brain/awz290>
 5. Akhlebnina M.I., Mel'nikov I.A., Akhadov T.A. Algorithm for radiological diagnosis of acute TBI in an emergency hospital. *Detskaya khirurgiya*. 2020; 24(S1): 17–25. (in Russian)
 6. Iverson G.L., Karr J.E., Gardner A.J., Silverberg N.D., Terry D.P. Results of scoping review do not support mild traumatic brain injury being associated with a high incidence of chronic cognitive impairment: Commentary on McInnes et al. 2017. *PLoS One*. 2019; 14(9): e0218997. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218997>
 7. Yuh E.L., Mukherjee P., Lingsma H.F., Yue J.K., Ferguson A.R., Gordon W.A., et al. Magnetic resonance imaging improves 3-month outcome prediction in mild traumatic brain injury. *Ann. Neurol*. 2013; 73(2): 224–35. <https://doi.org/10.1002/ana.23783>
 8. Sugiyama K., Kondo T., Higano S., Endo M., Watanabe H., Shindo K., et al. Diffusion tensor imaging fiber tractography for evaluating diffuse axonal injury. *Brain Inj*. 2007; 21(4): 413–9. <https://doi.org/10.1080/02699050701311042>
 9. Izzy S., Mazwi N.L., Martinez S., Spencer C.A., Klein J.P., Parikh G., et al. Revisiting grade 3 diffuse axonal injury: not all brainstem microbleeds are prognostically equal. *Neurocrit. Care*. 2017; 27(2): 199–207. <https://doi.org/10.1007/s12028-017-0399-2>
 10. Akhadov T.A., Semenova N.A., Valiullina S.A., Manzhurtsev A.V., Bozhko O.V., Mel'nikov I.A., et al. Magnetic resonance imaging in assessing severe traumatic brain injury and predicting brain recovery in children. *Rossiyskiy pediatricheskiy zhurnal*. 2020; 23(5): 291–8. <https://doi.org/10.18821/1560-9561-2020-23-5-291-298> (in Russian)
 11. Spitz G., Maller J.J., Ng A., O'Sullivan R., Ferris N.J., Ponsford J.L. Detecting lesions after traumatic brain injury using susceptibility weighted imaging: A comparison with fluid-attenuated inversion recovery and correlation with clinical outcome. *J. Neurotrauma*. 2013; 30(24): 2038–50. <https://doi.org/10.1089/neu.2013.3021>
 12. Keene C.D., Latimer C.S., Steele L.M., Mac Donald C.L. First confirmed case of chronic traumatic encephalopathy in a professional bull rider. *Acta Neuropathologica*. 2018; 135(2): 303–5. <https://doi.org/10.1007/s00401-017-1801-z>
 13. Tagge C.A., Fisher A.M., Minaeva O.V., Gaudreau-Balderrama A., Moncaster J.A., Zhang X.L., et al. Concussion, microvascular injury, and early tauopathy in young athletes after impact head injury and an impact concussion mouse model. *Brain*. 2018; 141(2): 422–58. <https://doi.org/10.1093/brain/awx350>
 14. Hütter B.O., Altmepfen J., Kraff O., Maderwald S., Theysohn J.M., Ringelstein A., et al. Higher sensitivity for traumatic cerebral microbleeds at 7 T ultra-high field MRI: is it clinically significant for the acute state of the patients and later quality of life? *Ther. Adv. Neurol. Disord*. 2020; 13: 1756286420911295. <https://doi.org/10.1177/1756286420911295>

Сведения об авторах:

Ахадов Толибджон Абдуллаевич, доктор мед. наук, проф., руководитель отдела лучевых методов диагностики, НИИ НДХиТ, akhadov@mail.ru; **Зайцева Екатерина Сергеевна**, врач рентгенолог отдела лучевых методов диагностики НИИ НДХиТ, katarina0594@mail.ru; **Маматкулов Алишер Джахангирович**, нейрохирург, НИИ НДХиТ, niindht@zdrav.mos.ru; **Божко Ольга Васильевна**, канд. мед. наук, вед. науч. сотр. отдела лучевых методов диагностики, НИИ НДХиТ, bozhko_olga@mail.ru; **Мельников Илья Андреевич**, канд. мед. наук, врач-рентгенолог отдела лучевых методов диагностики, НИИ НДХиТ, ilyamed@mail.ru; **Семёнова Наталия Александровна**, доктор биол. наук, канд. хим. наук, гл. науч. сотр., НИИ НДХиТ, pmg-semen@mail.ru; **Валиуллина Светлана Альбертовна**, доктор мед. наук, проф., первый заместитель директора НИИ НДХиТ, руководитель отдела реабилитации, vsa64@mail.ru; **Манжурицев Андрей Валерьевич**, науч. сотр., НИИ НДХиТ, andrey.man.93@gmail.com; **Демина Анна Николаевна**, врач-рентгенолог отдела лучевых методов диагностики, НИИ НДХиТ, savi.2021@bk.ru; **Хусаинова Дарья Николаевна**, науч. сотр. отдела ИТ НИИ НДХиТ, dsavina@yandex.ru; **Дмитренко Дмитрий Михайлович**, зав. отд-нием рентгенодиагностики НИИ НДХиТ, dmitrenich@mail.ru; **Ахлебинина Мария Игоревна**, врач-рентгенолог отдела лучевых методов диагностики НИИ НДХиТ, akhlebnina.m.i@gmail.com; **Костикова Татьяна Дмитриевна**, врач-рентгенолог отдела лучевых методов диагностики, НИИ НДХиТ, kostikovatd@gmail.com; **Меньщиков Петр Евгеньевич**, канд. физ.-мат. наук, специалист по поддержке научных исследований Philips, petr.menshchikov@philips.com