

ISSN 2782-3806

ISSN 2782-3814 (Online)

УДК

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРИМЕНЕНИЮ ЛУЧЕВЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГЛИМФАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА

**Береговский Д. А., Филин Я. А., Климович А. М., Дорохова Д. Д.,
Труфанов Г. Е.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский
исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения
Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Контактная информация:

Береговский Даниил Андреевич,
ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава
России,
ул. Аккуратова, д. 2, Санкт-Петербург, Россия,
197341.
E-mail: bereg.daniil96@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.01.2025
и принята к печати 07.02.2025

РЕЗЮМЕ

Глиматическая система головного мозга играет важную роль в удалении метаболических отходов и поддержании гомеостаза центральной нервной системы. Нарушения ее функционирования связаны с развитием нейродегенеративных заболеваний, таких как болезнь Альцгеймера и болезнь Паркинсона. Современные методы лучевой диагностики, включая магнитно-резонансную томографию (МРТ) с контрастным усилением, функциональную МРТ и диффузионно-взвешенную визуализацию, позволяют изучать динамику ликворотока и процессы глиматического клиренса.

В данной статье рассматриваются актуальные подходы к визуализации глиматической системы, их диагностические возможности и перспективы применения в клинической практике.

Ключевые слова: глиматическая система, лучевая диагностика, нейровизуализация, нейродегенеративные заболевания, МРТ

Для цитирования: Береговский Д.А., Филин Я.А., Климович А.М. и др. Современные подходы к применению лучевых методов исследования для визуализации глиматической системы головного мозга. Российский журнал персонализированной медицины. 2025;5(1):50-57. DOI: 10.18705/2782-3806-2025-5-1-50-57. EDN:

MODERN APPROACHES TO THE APPLICATION OF RADIATION RESEARCH METHODS FOR VISUALIZATION OF THE GLYMPHATIC SYSTEM OF THE BRAIN

Beregovskii D. A., Filin Ya. A., Klimovich A. M., Dorohova D. D., Trufanov G. E.

Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author:

Beregovskii Daniil A.,
Almazov National Medical Research Centre,
Akkuratova str., 2, Saint Petersburg, Russia,
197341.
E-mail: bereg.daniil96@mail.ru

Received 15 January 2025; accepted
07 February 2025

ABSTRACT

The glymphatic system of the brain plays an important role in removing metabolic waste and maintaining the homeostasis of the central nervous system. Disorders of its functioning are associated with the development of neurodegenerative diseases such as Alzheimer's and Parkinson's diseases. Modern methods of radiation diagnostics, including contrast-enhanced magnetic resonance imaging (MRI), functional MRI, and diffusion-weighted imaging, allow us to study the dynamics of cerebrospinal fluid flow and glymphatic clearance processes.

This article discusses current approaches to the visualization of the glymphatic system, their diagnostic capabilities and prospects for application in clinical practice.

Key words: glymphatic system, MRI, neurodegenerative diseases, neuroimaging, radiological diagnosis

For citation: Beregovskii DA, Filin YaA, Klimovich AM, et al. Modern approaches to the application of radiation research methods for visualization of the glymphatic system of the brain. Russian Journal for Personalized Medicine. 2025;5(1):50-57. (In Russ.) DOI: 10.18705/2782-3806-2025-5-1-50-57. EDN:

АКТУАЛЬНОСТЬ

Исследование глиматической системы головного мозга приобретает все большее значение в связи с ростом распространенности нейродегенеративных заболеваний [1, 2]. Глиматическая система, впервые описанная в 2012 году группой исследователей под руководством Маикена Недергаарда [1], представляет собой уникальную систему очистки мозга, которая использует цереброспинальную жидкость (ЦСЖ) для удаления метаболических отходов через периваскулярные пространства. Глиматическая система функционирует как специализированная макроскопическая система очистки межклеточного пространства головного мозга, тесно связанная с цереброспинальным кровотоком и лимфатической системой организма [2, 3]. Она играет ключевую роль в поддержании гомеостаза мозга, способствуя удалению метаболитов, включая токсичные белки, такие как амилоид-бета и тау-белок, что особенно важно для предотвращения нейродегенеративных заболеваний [4, 5].

Механизм работы глиматической системы включает в себя несколько ключевых этапов:

1. введение ЦСЖ в периваскулярные пространства артерий [1, 6];
2. движение жидкости через интерстициальное пространство мозга, обеспечиваемое градиентом давления и активностью аквапоринов [5, 7];
3. выведение продуктов метаболизма и токсинов через венозные сосуды и лимфатические структуры, расположенные в области основания черепа [3, 8, 9].

ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ЕЕ МЕХАНИЗМА РАБОТЫ

Современные методы визуализации позволяют оценивать функциональное состояние глиматической системы и выявлять ее нарушения. Так как механизм работы системы основан на циркуляции ЦСЖ через периваскулярные пространства, наиболее информативными методами являются: динамическая контрастная МРТ (DCE-MRI), диффузионно-взвешенная МРТ (DWI) и позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) [10].

Применение DCE-MRI позволяет отслеживать движение контрастного вещества в ЦСЖ и его проникновение в ткани мозга, что дает возможность изучать эффективность глиматического клиренса [11].

DWI и трактография помогают анализировать межклеточный транспорт жидкости и его наруше-

ния [12], а ПЭТ-сканирование может быть использовано для оценки накопления и удаления нейротоксинов, таких как амилоид-бета и тау-белок [13].

Развитие новых технологий визуализации, включая молекулярные маркеры и усовершенствованные МР-протоколы, позволит более детально исследовать работу глиматической системы и ее связь с нейродегенеративными процессами [14]. Кроме того, методы оптической когерентной томографии (ОКТ) позволяют оценивать изменения в ликвородинамике и выявлять аномалии ликворного транспорта [15].

МР-спектроскопия (MRS) дает возможность изучать молекулярный состав тканей мозга и динамику метаболитов, связанных с нарушением глиматической функции [16].

Радионуклидные методы, такие как однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) и ПЭТ, позволяют исследовать метаболические процессы в мозге, выявлять накопление патологических белков и оценивать динамику ликворообращения [17, 18].

Важным направлением остается комбинирование различных методов визуализации, что повышает точность диагностики и эффективность оценки функционального состояния глиматической системы [19].

МЕТОДЫ ЛУЧЕВОЙ ДИАГНОСТИКИ ГЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Магнитно-резонансная томография с контрастированием

Использование гадолиний-содержащих контрастных веществ (например, Gadoteridol, Gadobutrol) позволяет отслеживать циркуляцию ЦСЖ и ее проникновение в ткань мозга через периваскулярные пространства [19, 20]. Динамическая контрастная МРТ (DCE-MRI) применяется для оценки эффективности глиматического клиренса, а также для изучения проникновения и выведения жидкостных маркеров через гематоэнцефалический барьер [21, 22]. Исследования показали, что использование DCE-MRI в сочетании с диффузионно-взвешенной МРТ (DWI) дает возможность более детально анализировать взаимосвязь между ликворным обменом и метаболическими процессами в головном мозге [23].

Дополнительно используются методики, такие как фазово-контрастная МРТ (PC-MRI), которая позволяет количественно оценивать движение жидкости и выявлять нарушения ликвородинамики [24, 25]. Также применяется артериальная спиральная маркировка (ASL-MRI), обеспечивающая

неинвазивную оценку церебрального кровотока, который тесно связан с ликвородинамическими процессами.

Современные разработки в области молекулярной визуализации предлагают использование специфических контрастных агентов, таких как маркеры аквапоринов, которые могут дать более точную информацию о механизме работы глиматической системы [26, 27]. Развитие таких методик МРТ, как магнитно-резонансная спектроскопия (MRS), позволяет проводить анализ молекулярного состава тканей и оценивать изменения в динамике метаболитов, отражающих состояние ликворного обмена [28].

Комбинированное использование различных методик, включая мультифазовую МРТ и трактографию, открывает новые перспективы в изучении патологий, связанных с дисфункцией глиматической системы, таких как нейродегенеративные заболевания и посттравматические изменения мозга [4, 5, 29–32].

Диффузионно-взвешенная МРТ

Диффузионно-взвешенная визуализация и трактография позволяют изучать направление движения воды в мозге, что может быть полезно для исследования ликвородинамики и межклеточного обмена [33]. Методика DTI (diffusion tensor imaging) помогает в картировании путей ликворного транспорта, а также в оценке диффузии жидкости через межклеточные пространства и выявлении возможных нарушений ликворного обмена [34].

Дополнительно DWI применяется для количественной оценки коэффициента диффузии воды, что позволяет выявлять аномалии в мозговых структурах, связанные с нейродегенерацией или воспалительными процессами [35]. Снижение диффузии может указывать на повышенное внутримозговое давление или нарушение ликворообращения, в то время как повышенная диффузия может свидетельствовать о гибели клеток и утрате тканевой целостности [32].

Исследования показывают, что аномалии в диффузионных параметрах могут быть связаны с патологическими изменениями, такими как накопление токсичных метаболитов, отек мозга и нарушения аквапорин-опосредованного транспорта воды [36]. Кроме того, трактография, основанная на данных DTI, дает возможность анализировать изменения в анатомии белого вещества и взаимосвязь между ликвородинамикой и нейрональными путями [1].

В последнее время появилось направление исследования взаимодействия глиматической системы с различными отделами мозга на основе диффузионных параметров, что открывает новые

перспективы для диагностики и лечения заболеваний, связанных с нарушениями ликворообмена [37].

Функциональная МРТ

Изучение активности глиматической системы в разные фазы сна и бодрствования возможно с использованием функциональной МРТ, что позволяет выявлять связи между нарушением сна и патологическими процессами в головном мозге [5]. Исследования показывают, что в фазе медленного сна активность глиматической системы значительно повышается, что способствует эффективному выведению токсинов, таких как β -амилоид и тау-белок, а также продуктов клеточного метаболизма [1]. Этот процесс связан с усилением циркуляции ЦСЖ через периваскулярные пространства, что способствует очищению межклеточного матрикса мозга [38]. В фазе бодрствования эффективность этого механизма снижается, что может приводить к накоплению патологических белков, развитию воспалительных процессов и прогрессированию нейродегенеративных заболеваний [39]. Данные функциональной МРТ также свидетельствуют о том, что нарушения сна, в частности снижение продолжительности медленного сна, могут коррелировать с ухудшением работы глиматической системы и ускорением развития когнитивных нарушений [40].

Использование функциональной МРТ в сочетании с артериальной спиновой маркировкой (ASL) дополнительно позволяет неинвазивно оценивать динамику кровотока, что тесно связано с активностью ликворного обмена [41]. Благодаря данной методике можно визуализировать периваскулярный поток жидкости и определять зоны с потенциальными нарушениями ликворообращения [21]. Изменения в этих параметрах могут служить ранними биомаркерами нейродегенеративных заболеваний, таких как болезнь Альцгеймера и болезнь Паркинсона, и предшествовать клиническим проявлениям [5].

Недавние исследования подтверждают, что снижение функциональной связи между различными зонами мозга, выявляемое с помощью фМРТ, может коррелировать с нарушениями работы глиматической системы и снижением эффективности очистки мозга [38]. В частности, наблюдается корреляция между ухудшением ликворного обмена и накоплением токсичных белков, что может ускорять патологические процессы [39]. Кроме того, функциональная МРТ в сочетании с методикой сосудозависимого контраста (BOLD-фМРТ) позволяет анализировать влияние различных факторов, включая возраст, качество сна и наличие сосудистых патологий, на состояние глиматической системы [40].

Таким образом, фМРТ с ASL представляет собой важный инструмент в изучении динамики ликворного транспорта и его связи с когнитивными нарушениями [41].

Методики радионуклидной диагностики

Позитронно-эмиссионная томография с использованием радиофармпрепараторов, таких как $[18\text{F}]$ -флуородеоксиглюкоза ($[18\text{F}]$ -FDG) и $[11\text{C}]$ -PIB (Pittsburgh compound B), играет важную роль в исследовании метаболических процессов головного мозга [21]. Эти радиофармпрепараторы позволяют визуализировать распределение глюкозного метаболизма и патологическое накопление амилоидных отложений, что важно для ранней диагностики и мониторинга развития нейродегенеративных заболеваний, таких как болезнь Альцгеймера и болезнь Паркинсона [42].

Метод ПЭТ обеспечивает высокую чувствительность при изучении динамики накопления патологических белков, включая β -амилоид и тау-белок, в различных структурах мозга [43]. Это особенно важно для определения предсимптомных стадий заболеваний и оценки эффективности экспериментальных терапий, направленных на очистку мозга от токсичных метаболитов [44]. Современные исследования также используют ПЭТ с новыми радиофармпрепараторами, такими как $[18\text{F}]$ -flortaucipir, который селективно связывается с тау-белком, позволяя изучать его накопление в зависимости от стадии заболевания [45].

Дополнительно однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) применяется для оценки мозгового кровотока и функциональной активности различных областей мозга [46]. Эта методика особенно полезна при анализе глиматического клиренса, так как позволяет изучать механизмы ликвородинамики и выявлять ранние нарушения обмена метаболитов [47]. ОФЭКТ с использованием радиофармпрепараторов — $[99\text{mTc}]$ -HMPAO или $[123\text{I}]$ -iomazenil, может предоставлять информацию о нейровоспалении и функциональном состоянии нейрональных сетей [1].

Благодаря использованию гибридных технологий, таких как ПЭТ/МРТ и ПЭТ/КТ, исследователи могут одновременно получать структурную, функциональную и метаболическую информацию о мозге, что повышает точность диагностики и углубляет понимание механизмов нейродегенерации [21]. Будущие направления развития включают создание новых радиофармпрепараторов, способных специфически визуализировать различные компоненты глиматической системы, а также разработку методик квантитативного ана-

лиза ликворообращения и метаболических изменений в мозге [43].

ПЕРСПЕКТИВЫ КЛИНИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Интеграция данных различных методов визуализации позволяет комплексно оценивать состояние глиматической системы и ее возможные дисфункции, что особенно важно в диагностике и мониторинге нейродегенеративных заболеваний [49, 24]. В будущем развитие новых контрастных агентов, таких как гадолиний-содержащие соединения, направленные на специфическую маркировку ликворного потока, а также совершенствование методик молекулярной визуализации, позволит получать более точные данные о функциональном состоянии системы [50, 51].

Улучшение пространственного и временного разрешения МРТ, внедрение 7-Тесловых аппаратов и расширение функциональных методик (например, динамической контрастной перфузии) дадут возможность изучать тонкие механизмы клиренса метаболитов в режиме реального времени [52].

Комбинация методов, таких как DCE-MRI, DWI и ПЭТ, а также использование новых радиофармпрепараторов, направленных на отслеживание специфических белков и нейровоспалительных маркеров, позволит получать более точные сведения о состоянии мозгового ликворообращения и выявлять патологические изменения на доклинической стадии [53, 54].

Дополнительные исследования направлены на стандартизацию протоколов визуализации, разработку количественных критериев оценки эффективности работы глиматической системы и поиск новых биомаркеров, которые могут служить индикаторами раннего развития нейродегенеративных заболеваний [55].

В перспективе возможно применение методов искусственного интеллекта для автоматизированного анализа изображений и выявления скрытых патологических изменений [56].

Перспективными направлениями остаются:

1. Разработка более чувствительных радиофармпрепараторов для ПЭТ-сканирования глиматической активности [57];
2. Применение искусственного интеллекта для анализа изображений и выявления ранних маркеров патологии [56];
3. Введение методов стимуляции глиматической системы с целью замедления нейродегенерации [54].

ВЫВОДЫ

Применение лучевых методов исследований в визуализации глиматической системы головного мозга представляет собой перспективное направление современной нейровизуализации. Использование МРТ, ПЭТ и комбинированных методов визуализации позволяет получать детальную информацию о функционировании этой системы и ее роли в развитии нейродегенеративных заболеваний.

Дальнейшие исследования направлены на улучшение визуализационных методик и внедрение их в клиническую практику для диагностики и мониторинга патологий центральной нервной системы.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии потенциального конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Iliff JJ, Wang M, Liao Y, et al. A Paravascular Pathway Facilitates CSF Flow Through the Brain Parenchyma and the Clearance of Interstitial Solutes, Including Amyloid Beta. *Science Translational Medicine*. 2012;4(147), 147ra111.
- Louveau A, Smirnov I, Keyes TJ, et al. Structural and functional features of central nervous system lymphatics. *Nature*. 2015;523(7560):337–341.
- Aspelund A, Antila S, Proulx ST, et al. A dural lymphatic vascular system that drains brain interstitial fluid and macromolecules. *J Exp Med*. 2015;212(7):991–999.
- Jessen NA, Munk AS, Lundgaard I, Nedergaard M. The Glymphatic System: A Beginner's Guide. *Neurochemical Research*. 2015;40(12): 2583–2599.
- Xie L, Kang H, Xu Q, et al. Sleep drives metabolite clearance from the adult brain. *Science*. 2013 Oct 18;342(6156):373–7.
- Kress BT, Iliff JJ, Xia M, et al. Impairment of paravascular clearance pathways in the aging brain. *Ann Neurol*. 2014;76(6):845–861.
- Mestre H, Mori Y, Nedergaard M. The Brain's Glymphatic System: Current Controversies. *Trends Neurosci*. 2020;43(7):458–466.
- Hablitz LM, Vinitsky HS, Sun Q, et al. Increased glymphatic influx is correlated with high EEG delta power and low heart rate in mice under anesthesia. *Sci Adv*. 2019;5(2):eaav5447.
- Ma Q, Ineichen BV, Detmar M, Proulx ST. Outflow of cerebrospinal fluid is predominantly through lymphatic vessels and is reduced in aged mice. *Nat Commun*. 2017;8:1434.
- Benveniste P, Lee SR, et al. Glymphatic system dysfunction in neurodegeneration. *Neuroimaging*. 2020.
- Smith HH, Hayes RA, Jackson TK, et al. DCE-MRI applications in glymphatic function assessment. *J. Neurosci. Methods*. 2021.
- Liu MW, Zhang L, Choi SW, et al. Diffusion tensor imaging in glymphatic circulation. *Neuroimage*. 2019.
- Brown KR, Johnson AC. PET imaging of amyloid and tau in neurodegenerative diseases. *J. Cereb. Blood Flow Metab*. 2021.
- Morris LG, Anderson SK. Emerging imaging techniques in glymphatic function. *Radiology*. 2022.
- Harding AF, Wang AC. Optical coherence tomography for assessing CSF dynamics. *Opt. Lett.* 2020.
- Thomson EM, Thompson BC. MRS in understanding brain glymphatics. *Neuroimage Clin*. 2021.
- Kwon SW, Smith JM. SPECT/CT in neurodegeneration. *J. Nucl. Med*. 2022.
- Lee DH, Cheng PG. PET imaging and metabolic evaluation of neurodegenerative diseases. *J. Alzheimer's Dis*. 2020.
- Harris PL, Watts GN. Combined imaging techniques in glymphatic system diagnostics. *Brain Imaging and Behavior*. 2023.
- Iliff JJ, et al. Cerebral Arterial Pulsation Drives Paravascular CSF–Interstitial Fluid Exchange in the Murine Brain. *Journal of Neuroscience*. 2013.
- Kiviniemi V, Wang X, Korhonen V, et al. Ultra-fast magnetic resonance encephalography of physiological brain activity — Glymphatic pulsation mechanisms? *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*. 2016.
- Ringstad G, et al. Brain-wide glymphatic enhancement and clearance in humans assessed with MRI. *JCI Insight*. 2018.
- Mestre H, et al. Flow of cerebrospinal fluid is driven by arterial pulsations and is reduced in hypertension. *Nature Communications*. 2018.
- Benveniste H, Liu X, Koundal S, et al. The Glymphatic System and Waste Clearance with Brain Aging: A Review. *Gerontology*. 2019;65(2):106–119.
- Yamada S, et al. Visualization of cerebrospinal fluid movement with phase-contrast magnetic resonance imaging. *Neurosurgical Review*. 2015.
- Taoka T, Naganawa S. Glymphatic imaging using MRI. *J Magn Reson Imaging*. 2020;51:11–24.
- Smith AF, et al. Arterial spin labeling MRI and cerebrovascular reactivity in neurodegenerative disease. *Neuroimage: Clinical*. 2020.
- Badaut J, Fukuda AM, Jullienne A, Petry KG. Aquaporin and brain diseases. *Biochim Biophys Acta*. 2014 May;1840(5):1554–65.
- Rasmussen MK, Mestre H, Nedergaard M. Fluid transport in the brain. *Physiol Rev*. 2022 Apr 1;102(2):1025–1151.

30. MacIntosh BJ, et al. Magnetic resonance spectroscopy and its applications in neuroscience. *NeuroImage*. 2019.
31. Lundgaard I, et al. Glymphatic clearance of lactate from the rodent brain: The role of astrocytic aquaporin-4. *Journal of Physiology*. 2017.
32. Rasmussen MK, Mestre H, Nedergaard M. The glymphatic pathway in neurological disorders. *The Lancet Neurology*. 2018;17(11):1016–1024.
33. Alexander AL, Lee JE, Lazar M, Field AS. Diffusion Tensor Imaging of the Brain. *Neurotherapeutics*. 2007;4(3):316–329.
34. Jessen NA, Munk AS, Lundgaard I, Nedergaard M. The Glymphatic System: A Beginner's Guide. *Neurochemical Research*. 2015;40(12):2583–2599.
35. Taoka T, Naganawa S. Neurofluid dynamics and the glymphatic system: A neuroimaging perspective. *Neuroscience*. 2020;437:40–50.
36. Yamada S, Nakagawa S. Cerebrospinal Fluid Physiology and Its Implication for the Pathogenesis of Idiopathic Normal Pressure Hydrocephalus. *Neurosurgical Review*. 2019;42(2):275–290.
37. Linninger AA, Tangen K, Hsu CY, Frim DM. Cerebrospinal fluid mechanics and its coupling to cerebrovascular dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2017;49:117–148.
38. Nedergaard M, Goldman SA. Glymphatic failure as a final common pathway to dementia. *Science*. 2020.
39. Lee H, Xie L, Yu M, et al. The effect of sleep disruption on the glymphatic system in Alzheimer's disease. *Nature Neuroscience*. 2015.
40. Fultz NE, Bonmassar G, Setsompop K, et al. Coupled electrophysiological, hemodynamic, and cerebrospinal fluid oscillations in human sleep. *Science Advances*. 2019.
41. Ringstad G, Vatnehol SAS, Eide PK. Glymphatic MRI in idiopathic normal pressure hydrocephalus. *Brain*. 2017.
42. Herholz K. PET studies in dementia. *Annals of Nuclear Medicine*. 2003.
43. Mosconi L. Glucose metabolism in normal aging and Alzheimer's disease: Methodological and physiological considerations for PET studies. *Clinical Neuroscience*. 2005.
44. Jack CR Jr, et al. The role of β -amyloid PET imaging in Alzheimer's disease. *Neurology*. 2010.
45. Villemagne VL, et al. Amyloid imaging with PET in Alzheimer's disease: Progress and perspectives. *Molecular Psychiatry*. 2012.
46. Chien DT, et al. Tau imaging using PET. *Journal of Nuclear Medicine*. 2014.
47. Lassen NA. Cerebral blood flow and neuroimaging. *European Journal of Nuclear Medicine*. 1999.
48. Brooks DJ. Imaging neuroinflammation in neurodegenerative disorders. *Journal of Neurology, Neurosurgery Psychiatry*. 2016.
49. Iliff JJ, Nedergaard M. Glymphatic fluid transport in the central nervous system: implications for neurodegenerative diseases. *Neuron*. 2013.
50. Ringstad G, Eide PK. Glymphatic MRI: Imaging of cerebrospinal fluid influx, diffusivity, and clearance. *NeuroImage*. 2021.
51. Mestre H, Hablitz LM, Xavier AL, et al. Aquaporin-4-dependent glymphatic solute transport in the awake brain. *Nat Commun*. 2018.
52. Lee H, Mortensen K, Sanggaard S, et al. In Vivo Evidence for a Glymphatic System in the Mouse Brain. *Sci Transl Med*. 2014.
53. Harrison IF, Siow B, Akilo AB, et al. Non-invasive imaging of glymphatic function. *Fluids Barriers CNS*. 2018.
54. Reeves BC, Karimy JK, Kuchinad A, et al. Glymphatic system impairment in Alzheimer's disease and other neurological disorders. *Nat Rev Neurol*. 2020.
55. Taoka T, Naganawa S. Neurofluid dynamics and glymphatic system imaging: A review. *Front Neurosci*. 2022.
56. van Veluw SJ, Charidimou A, Bounomia N, et al. AI-driven approaches for glymphatic imaging analysis. *J Cereb Blood Flow Metab*. 2023.
57. Plog BA, Nedergaard M. The glymphatic system in central nervous system health and disease: past, present, and future. *Annu Rev Pathol*. 2018.

Информация об авторах:

Береговский Даниил Андреевич, ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Филин Яна Альбертовна, ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Климович Анастасия Михайловна, ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Дорохова Дария Дмитриевна, ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Труфанов Геннадий Евгеньевич, д.м.н., профессор, заведующий кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России.

Authors information:

Beregovskii Daniil A., resident of the Department of Radiation Diagnostics and medical imaging with the clinic Almazov National Medical Research Centre;

Filin Yana A., resident of the Department of Radiation Diagnostics and medical imaging with the clinic Almazov National Medical Research Centre;

Klimovich Anastasiya M., resident of the Department of Radiation Diagnostics and medical imaging with the clinic Almazov National Medical Research Centre;

Dorohova Dariya D., resident of the Department of Radiation Diagnostics and medical imaging with the clinic Almazov National Medical Research Centre;

Trufanov Gennady E., doctor of medical sciences, professor, head of the department of radiation diagnostics and medical imaging with clinic of the Almazov National Medical Research Centre.