

С.Г. Мирзоянц, А.Н. Башков, Н.А. Баркалая

МЕТОДЫ ЛУЧЕВОЙ ДИАГНОСТИКИ БОЛЕЗНИ ПАРКИНСОНА: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Сергей Генрихович Мирзоянц, e-mail: mirza-sg@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Систематизировать современные подходы визуализации при болезни Паркинсона (БП), оценить информативность ключевых радиофармпрепаратов, их диагностические возможности, чувствительность и специфичность и роль гибридных методов в ранней и дифференциальной диагностике и динамическом мониторинге БП.

Материал и методы: Проанализированы руководства EANM/SNMMI и исследования 2018–2025 гг. по ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ, ПЭТ/МРТ и МРТ (NM-MRI, QSM, DTI, 7T). DAT-SPECT с [¹²³I]FP-CIT остаётся клиническим стандартом выявления пресинаптической дисфункции; [^{99m}Tc]TRODAT-1 служит доступной альтернативой. ПЭТ с [¹⁸F]FE-PE2I обеспечивает более высокое пространственное разрешение и количественную точность; [¹⁸F]FDOPA отражает синтез дофамина, [¹⁸F]FDG – метаболические паттерны; [¹⁸F]AV-133 (VMAT2) и [¹¹C]йохимбин расширяют оценку внедофаминергических систем. МРТ дополняет молекулярные методы, позволяя исключать органические причины паркинсонизма (вторичный паркинсонизм) и выявлять тонкие изменения чёрной субстанции; ПЭТ/МРТ объединяет молекулярные и морфологические данные в одном исследовании.

Результаты: Современные методы лучевой диагностики болезни Паркинсона демонстрируют высокую информативность в раннем выявлении нейродегенеративных изменений. Применение ОФЭКТ/КТ с [¹²³I]FP-CIT обеспечивает чувствительность и специфичность на уровне 93–95 % при дифференциальной диагностике болезни Паркинсона от эссенциального тремора и атипичных паркинсонизмов. [^{99m}Tc]TRODAT-1 используется как доступная альтернатива в странах с ограниченными ресурсами. ПЭТ/КТ с [¹⁸F]FE-PE2I и [¹⁸F]FDOPA позволяет проводить количественную оценку пресинаптической дисфункции и метаболических особенностей, снижение накопления [¹⁸F]FDOPA коррелирует со стадией болезни, а изменения при [¹⁸F]FDG фиксируются уже на ранних стадиях. Введение мультимодальных протоколов, включая ПЭТ/МРТ, делает возможным комплексное картирование структурных (нейромеланин, железо), биохимических и метаболических маркеров. Высокопольная МРТ выявляла до 98% утраты нейронов нигросомы-1, а современные NM-MPT протоколы в сочетании с методами машинного обучения и полуавтоматической сегментации обеспечивают диагностическую точность свыше 90%. Интеграция радионуклидной и структурной визуализации с применением искусственного интеллекта позволяет повысить точность ранней диагностики, а также проводить мониторинг прогрессирования болезни Паркинсона и эффективности терапии. По данным мультицентровых исследований и метаанализов, чувствительность и специфичность большинства радиофармпрепаратов превышают 90–95 %, а точность NM-MPT в выявлении болезни Паркинсона достигает 94%.

Ключевые слова: болезнь Паркинсона, радионуклидная визуализация, переносчик дофамина (DAT), ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ, ПЭТ/МРТ, [¹⁸F]FDOPA, [^{99m}Tc]TRODAT

Для цитирования: Мирзоянц С.Г., Башков А.Н., Баркалая Н.А. Методы лучевой диагностики болезни Паркинсона: обзор литературы // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2026. Т. 71. № 3. С. 98–105. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-98-105

S.G. Mirzoiants, A.N. Bashkov, N.A. Barkalaya

Radiological Diagnostic Methods for Parkinson's Disease: A Literature Review

A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Contact person: S.G. Mirzoiants, e-mail: mirza-sg@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: To systematize modern imaging approaches in PD, to evaluate the informativeness of key radiopharmaceuticals, their diagnostic capabilities, sensitivity and specificity, and the role of hybrid modalities in early and differential diagnosis as well as dynamic monitoring of PD.

Material and methods: Guidelines from EANM/SNMMI and studies from 2018–2025 on SPECT/CT, PET/CT, PET/MRI, and MRI (NM-MRI, QSM, DTI, 7T) were analyzed. DAT-SPECT with [¹²³I]FP-CIT remains the clinical standard for detecting presynaptic dysfunction; [^{99m}Tc]TRODAT-1 serves as an accessible alternative. PET with [¹⁸F]FE-PE2I provides higher spatial resolution and quantitative accuracy; [¹⁸F]FDOPA reflects dopamine synthesis, [¹⁸F]FDG – metabolic patterns; [¹⁸F]AV-133 (VMAT2) and [¹¹C]yohimbine expand assessment of non-dopaminergic systems. MRI complements molecular methods, enabling exclusion of organic causes of parkinsonism (secondary parkinsonism) and detecting subtle alterations of the substantia nigra; PET/MRI integrates molecular and morphological data within a single examination.

Results: Modern radiological diagnostic methods for PD demonstrate high informativeness in early detection of neurodegenerative changes. SPECT/CT with [¹²³I]FP-CIT provides sensitivity and specificity of 93–95% in differential diagnosis of PD versus essential tremor and atypical parkinsonian syndromes. [^{99m}Tc]TRODAT-1 is used as a cost-effective alternative in resource-limited countries. PET/CT with [¹⁸F]FE-PE2I and [¹⁸F]FDOPA enables quantitative assessment of presynaptic dysfunction and metabolic features; reduced [¹⁸F]FDOPA uptake correlates with disease stage, while [¹⁸F]FDG alterations are detectable at early stages. Implementation of multimodal protocols, including PET/MRI, allows comprehensive mapping of structural (neuromelanin, iron), biochemical, and metabolic markers. High-field MRI detects up to 98% of neuron loss in nigrosome-1, while modern NM-MRI protocols combined with machine learning and semi-automated

segmentation methods provide diagnostic accuracy above 90%. Integration of molecular and structural imaging with artificial intelligence enhances the precision of early diagnosis and enables monitoring of PD progression and therapeutic efficacy. According to multicenter studies and meta-analyses, sensitivity and specificity of most radiopharmaceuticals exceed 90–95%, and the accuracy of NM-MRI in PD detection reaches 94%.

Keywords: *Parkinson's disease, radionuclide imaging, dopamine transporter (DAT), SPECT/CT, PET/CT, PET/MRI, [¹⁸F]FDOPA, [^{99m}Tc]TRODAT*

For citation: Mirzoiants SG, Bashkov AN, Barkalaya NA. Radiological Diagnostic Methods for Parkinson's Disease: A Literature Review. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2026;71(3):98–105. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-98-105

Введение

Болезнь Паркинсона (БП) – одно из наиболее распространённых нейродегенеративных заболеваний, уступающее по частоте только болезни Альцгеймера. Она оказывает значительное влияние на качество жизни пациентов и существенно увеличивает экономическую нагрузку на систему здравоохранения и социально обременяет трудоспособную часть общества. Согласно эпидемиологическим данным, распространённость БП продолжает расти, что связано как с увеличением продолжительности жизни населения, так и с улучшением выявляемости заболевания [1].

Клиническая диагностика БП на ранних стадиях остаётся сложной задачей. Заболевание часто маскируется под другие формы паркинсонизма или возрастные изменения моторики, а немоторные симптомы (нарушение сна, обоняния, вегетативные расстройства) нередко предшествуют двигательным проявлениям и не всегда ассоциируются в диагностическом отношении с БП [2]. Дифференциальная диагностика между идиопатической БП и атипичными паркинсоническими синдромами, такими как мультисистемная атрофия (MSA), прогрессирующий супрануклеарный паралич (PSP) или кортикобазальная дегенерация (CBD), требует комплексного подхода, включающего клинические, инструментальные и лабораторные методы.

Ключевым патофизиологическим процессом при БП является прогрессирующая дегенерация дофаминергических нейронов чёрной субстанции, приводящая к снижению уровня дофамина в nigrostriарном тракте. Переносчик дофамина (DAT), расположенный на пресинаптических окончаниях, играет центральную роль в регуляции концентрации нейромедиатора в синаптической щели. Снижение плотности DAT отражает утрату дофаминергической иннервации и служит надёжным биомаркером нейродегенерации. Это обусловило широкое применение методов молекулярной визуализации, таких как ОФЭКТ/КТ (однофотонная эмиссионная компьютерная томография, совмещённая с компьютерной томографией) и ПЭТ/КТ (позитронно-эмиссионная томография, совмещённая с компьютерной томографией) с радиофармпрепаратами, специфичными к DAT [3–6].

В последние годы также возрастает интерес к такой гибридной технологии как ПЭТ/МРТ [7, 8], нейромеланин-чувствительной МРТ (NM-MRI) [9] и применению искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации анализа изображений [10, 11]. Эти подходы открывают новые перспективы в ранней и дифференциальной диагностике, а также в мониторинге прогрессирования заболевания.

Патофизиологические основы и диагностические цели

БП относится к группе α -синуклеинопатий, для которых характерно патологическое накопление агрегированного α -синуклеина в нейронах, формирующее тельца Леви в телах нейронов и нейриты Леви в аксонах и

дендритах. Эти изменения сопровождаются прогрессирующей дегенерацией дофаминергических нейронов в компактной части чёрной субстанции и, как следствие, утратой дофаминергической иннервации полосатого тела [12].

Снижение уровня дофамина в полосатом теле приводит к появлению классических моторных симптомов – брадикинезии, ригидности и тремора покоя. Как отмечено в обзоре Hustad et al (2020), моторные нарушения возникают при уже утраченных 50–60 % дофаминергических нейронов чёрной субстанции [13].

Одним из важнейших биомаркеров состояния nigrostriарного тракта является пресинаптический переносчик дофамина (DAT), локализованный на окончаниях дофаминергических нейронов. DAT отвечает за обратный захват дофамина из синаптической щели, регулируя его концентрацию и длительность действия. Снижение плотности DAT в стриатуме отражает степень утраты дофаминергических нейронов и может быть количественно оценено методами молекулярной визуализации – ОФЭКТ/КТ или ПЭТ/КТ с радиофармпрепаратами, специфичными к DAT [3–5].

Помимо DAT, важными мишенями диагностики являются:

- ферритин и железо в чёрной субстанции, накапливающиеся при прогрессировании БП, что можно выявить методами магнитно-резонансного картирования (QSM, R2*, SWI) [9];
- нейромеланин, концентрация которого уменьшается по мере гибели пигментированных нейронов чёрной субстанции и голубого пятна, визуализируемый на NM-MPT;
- метаболические изменения в коре и подкорковых структурах, оцениваемые с помощью ¹⁸F-FDG-ПЭТ [14].

Таким образом, современная диагностика БП ориентирована не только на выявление структурных и функциональных изменений nigrostriарной системы, но и на оценку связанных с ней биомаркеров, что позволяет уточнить диагноз, определить стадию заболевания и проводить мониторинг его прогрессирования.

Методы визуализации: обзор современных ОФЭКТ/КТ подходов

ОФЭКТ/КТ является одним из наиболее распространённых методов радионуклидной визуализации при БП. Метод применяется для оценки функционального состояния пресинаптических дофаминергических окончаний за счёт визуализации переносчика дофамина (DAT). В клинической практике наибольшее распространение получил радиофармацевтический препарат [¹²³I]FP-CIT (DaTSCAN), обладающий высокой аффинностью к DAT. Обеспечение высокой чувствительности и специфичности позволяет дифференцировать БП от эссенциального тремора и немоторных гиперкинезов [17]. Также широко используется [^{99m}Tc]TRODAT-1 (рис. 1), который, несмотря на несколько меньшую аффинность к DAT,

демонстрирует высокую согласованность результатов с [¹²³I]FP-CIT и способен надёжно выявлять пресинаптическую дофаминергическую денервацию [3, 6]. Метод ОФЭКТ/КТ применяется в случаях клинической неопределённости, для дифференциации идиопатической БП от сосудистого и лекарственного паркинсонизма, а также для выявления пресинаптического дефицита при деменции с тельцами Леви [15, 16].

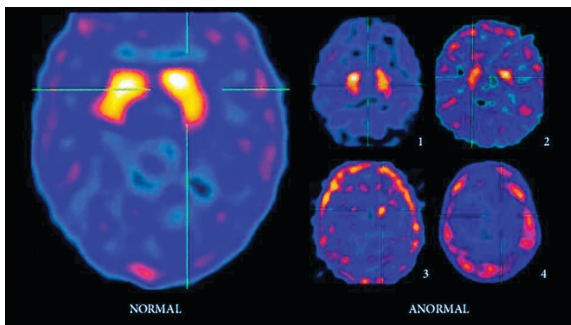


Рис. 1. Степень поражения в зависимости от накопления радиофармпрепарата при однофотонной эмиссионной компьютерной томографии головного мозга с ^{99m}Tc-TRODAT-1 [6]

Fig. 1. Degrees of involvement according to radiopharmaceutical uptake in cerebral SPECT with ^{99m}Tc-TRODAT-1 [6]

Современные протоколы исследования включают не только качественную, но и количественную оценку, например расчёт показателя специфического связывания (SBR) [33]. Это повышает воспроизводимость результатов, позволяет отслеживать динамику патологических изменений и минимизировать субъективность диагностических выводов. В последние годы активно внедряются автоматизированные системы обработки изображений и алгоритмы искусственного интеллекта, которые обеспечивают более точную сегментацию полосатого тела и расчёт количественных показателей [10]. К преимуществам метода относят доказанную клиническую ценность, относительную доступность и возможность полуколичественной оценки; к ограничениям – более низкое пространственное разрешение по сравнению с ПЭТ/КТ, влияние некоторых лекарственных препаратов на связывание РФП с DAT [17], а также лучевая нагрузка и необходимость йодной блокады при использовании меченых ¹²³I соединений.

ПЭТ/КТ

ПЭТ/КТ является высокочувствительным методом радионуклидной визуализации, позволяющим оценивать различные аспекты функционирования дофаминергической системы и активность сопутствующих патофизиологических процессов при БП. В отличие от ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ обеспечивает более высокое пространственное и временное разрешение, а также возможность количественного анализа метаболических и нейротрансмиттерных процессов.

Для визуализации пресинаптического дофаминергического дефицита применяются радиофармпрепараты нескольких групп. Одним из наиболее изученных является [¹⁸F]FDOPA, отражающий активность ароматической L-аминокислотной в пресинаптических дофаминергических терминалях и, следовательно, способность к синтезу дофамина клетками черной субстанции. Метод обладает достаточной чувствительностью на ранних стадиях заболевания, однако этот показатель может снижаться на поздних стадиях вследствие компенсаторных изменений [18]. При прямом сравнении FDOPA-ПЭТ и DAT-SPECT

([¹²³I]FP-CIT) в рутинной практике существенных различий по точности не выявлено, хотя в сценариях «клинически неясного паркинсонизма» DaTSCAN может быть чувствительнее – это следует учитывать при выборе метода (рис. 2) [18].

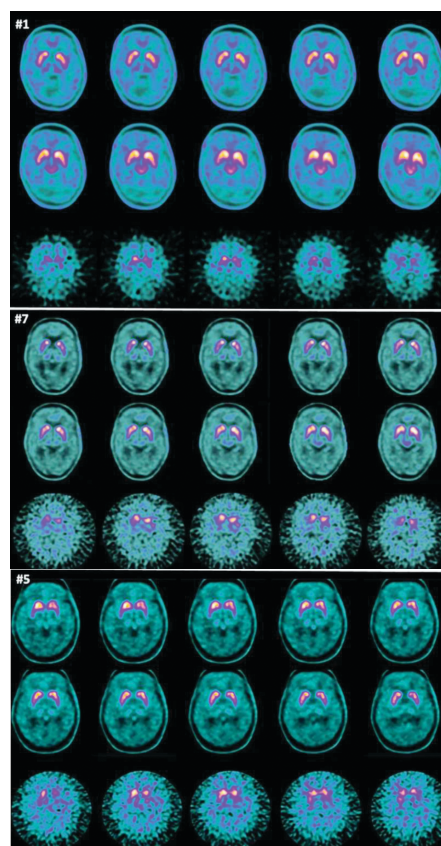


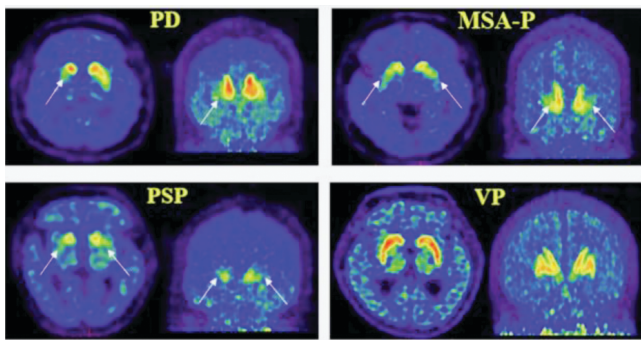
Рис. 2. Репрезентативные трансаксиальные изображения полосатого тела, полученные методом FDOPA-PET (2 верхних ряда для каждого случая) и (DAT-SPECT) (нижний ряд для каждого случая) для пациентов #1, #5 и #7. Во всех трёх случаях результаты FDOPA-PET были нормальными, а результаты DAT SPECT – патологическими [18]

Fig. 2. Representative transverse images of the striatum on FDOPA-PET (2 top rows for each case) and DAT-SPECT (bottom row for each case) for patients #1, #5 and #7. For all three cases, FDOPA-PET was reported normal and DAT SPECT abnormal [18]

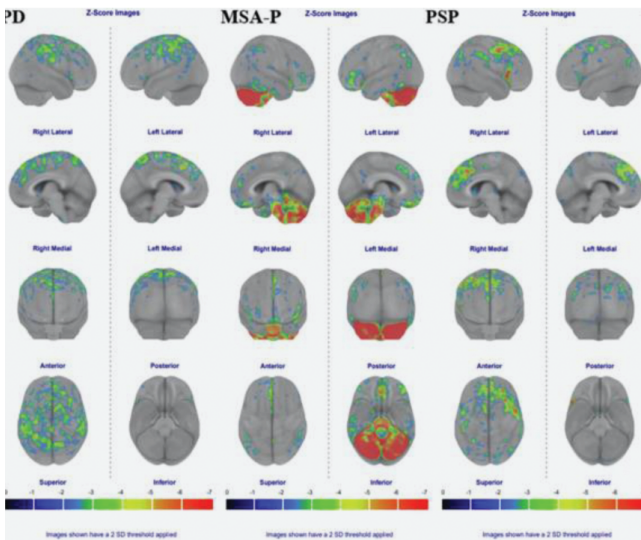
Кроме DAT-визуализации, при БП применяется ПЭТ/КТ с [¹⁸F]FDG для оценки метаболической активности головного мозга. Для пациентов с БП характерен специфический паттерн гипометаболизма в теменно-затылочных отделах коры головного мозга в сочетании с относительной сохранностью активности мозжечка и сенсомоторной коры, что может использоваться для дифференциальной диагностики БП с уже упоминавшимся атипичным паркинсонизмом, а также с сосудистым паркинсонизмом (VP), особенно при использовании двух трейсеров (например, ¹¹C-CFT+¹⁸F-FDG) (рис. 3) [14].

Другим направлением является визуализация везикулярного транспортера моноаминов 2-го типа (VMAT2) с помощью [¹⁸F]AV-133, которая позволяет количественно оценивать целостность нигростриарных терминалей и и может быть использована для мониторинга прогрессирования БП [19].

На стадии исследования находятся РФП, потенциально применимые не только для диагностики синуклеинопатий и оценки эффективности проводимого лечения, но и для динамического наблюдения за течением



А



Б

Рис. 3. А) изображения накопления ¹¹C-CFT. У пациента с БП (PD) наблюдается асимметричное снижение захвата ¹¹C-CFT; у пациента с множественной системной атрофией паркинсонического типа (MSA-P) наблюдается относительно симметричное снижение накопления ¹¹C-CFT, которое несколько больше, чем у пациента с БП (PD); у пациента с прогрессирующим надъядерным параличом (PSP) наблюдается значительное двустороннее снижение накопления РФП; у пациента с сосудистым паркинсонизмом (VP) наблюдается незначительное снижение поглощения ¹¹C-CFT. Стрелки на рис. 1а указывают на область со сниженным накоплением РФП. Б) Изображения Z-оценки ¹⁸F-FDG. У пациента с БП (PD) наблюдается гипометаболизм в префронтальной и теменно-затылочной коре и гиперметаболизм в мозжечке и мосту; у пациента с MSA-P наблюдается гипометаболизм в мозжечке и мосту; у пациента с PSP наблюдается гипометаболизм в префронтальной и теменно-затылочной коре. Маркер внизу изменил цвет с черного на красный, что указывает на постепенное снижение Z-оценки [14]

Fig. 3. A. ¹¹C-CFT uptake images. PD patient shows asymmetrical ¹¹C-CFT uptake reduction; MSA-P patient showed a relatively symmetrical reduction in ¹¹C-CFT uptake that was slightly greater than that observed in PD patient; PSP patient showed significant bilateral uptake reduction; VP patient shows non-significant ¹¹C-CFT uptake reduction. The arrows in Fig. 1a indicate the portion with a reduced uptake. Б. ¹⁸F-FDG Z-score images. PD patient shows hypometabolism in the prefrontal and parieto-occipital cortices, and hypermetabolism in the cerebellum and pons; MSA-P patient shows hypometabolism in the cerebellum and pons; PSP patient shows hypometabolism in the prefrontal and parieto-occipital cortices. The marker at the bottom changed from black to red, indicating a gradual decrease in the Z-score [14]

нием патологического процесса. С этой целью используют различные лиганды, а также антитела, меченные ¹²⁴I и ⁸⁹Zr [20].

Таким образом, хотя ПЭТ/КТ имеет более высокую стоимость и менее доступна по сравнению с ОФЭКТ/КТ, этот метод обеспечивает более детализированную оценку патологических процессов и может оказаться

предпочтительным в сложных клинических случаях или при проведении научных исследований.

MPT

Магнитно-резонансная томография (МРТ) при БП решает две ключевые задачи:

- исключение структурных причин паркинсонизма – опухолей, сосудистых изменений, демиелинизирующих процессов, нормотензивной гидроцефалии и др. [21];
- выявление тонких нейродегенеративных изменений чёрной субстанции и связанных с ней ядер, что стало возможным благодаря развитию специализированных протоколов (нейромеланин-чувствительная МРТ, SWI/QSM, 7Тл МРТ и диффузионные методы) [22, 23].

Нейромеланин-чувствительная МРТ (NM-MPT)

позволяет неинвазивно визуализировать пигментированные нейроны чёрной субстанции и голубого пятна. Снижение сигнала в чёрной субстанции коррелирует с потерей дофаминергических нейронов и выраженностью двигательных симптомов, что делает NM-MRI ценным инструментом для ранней диагностики и мониторинга прогрессирования заболевания [22, 23].

Современные методы нейромеланин-чувствительной МРТ в сочетании с картированием железа (SWI, QSM, T₂*/R₂*) позволяют получать количественные показатели, которые ассоциированы с тяжестью моторных симптомов и стадией БП. Комбинированный анализ сигналов нейромеланина и железа усиливает диагностическую точность и даёт возможность более тонко оценивать нарастание нейродегенерации [9].

Высокопольная МРТ (7 Тл)

Использование томографов с магнитной индукцией 7 Тл позволяет получать высокое пространственное разрешение и детализированное картирование зоны чёрной субстанции, включая визуализацию нигросомы-1. Дофаминергические нейроны компактной части черной субстанции объединяются в скопления, образуя нигросомы, из пяти нигросом наиболее информативной в диагностике БП является нигросома-1, которая находится в дорсальной части чёрной субстанции. Уже на начальной стадии БП утрачивается до 98% нейронов нигросомы-1, что делает ее высокочувствительным биомаркером. Исследования показывают, что такие протоколы улучшают выявление ранних изменений и дают дополнительные возможности количественного анализа [24, 35].

На T₂*/SWI изображениях у здоровых людей в области чёрной субстанции определяется характерная форма в виде хвоста ласточки (нигросома-1), которая исчезает при БП. Современные исследования на МРТ 7 Тл показали, что утрата этого сигнала коррелирует с накоплением железа и снижением уровня нейромеланина, отражающих нейродегенерацию чёрной субстанции [24]. Обзорные данные подтверждают, что утрата признака «ласточкин хвоста» (рис. 4) имеет высокий диагностический потенциал, особенно при стандартизации протоколов [25].

Диффузионные методы (DTI)

DTI позволяет изучать микроструктурные изменения в чёрной субстанции и базальных ганглиях. У пациентов с БП последовательно выявляют снижение дробной анизотропии и повышение среднего коэффициента диффузии, что отражает дегенерацию нигростриарных путей. Систематический обзор с мета-анализом подтвер-

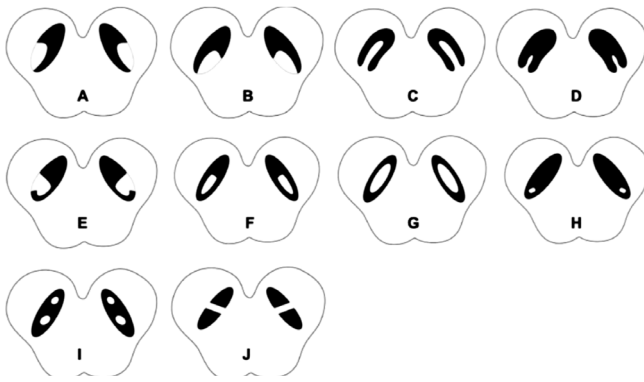


Рис. 4. Схематичное изображение вариантов нигросомы-1. А–D: в первом ряду показаны варианты знака «ласточкин хвост», обусловленные плоскостью сканирования или индивидуальным содержанием железа в нормальной нигросоме-1; Е–Н: во втором ряду показаны варианты знака «петля» или «яйцевидная форма»; I–J: в третьем ряду показаны нигросома-1 в виде знака «кластер» или «полоска» [34]

Fig. 4. Cartoon illustration of the nigrosome 1 variants. A–D in the first row show the swallowtail sign variants due to the scanning plane or individual iron content in the normal nigrosome 1; E–H in the second row show the loop or ovoid sign variants; and I–J in the third row show the nigrosome 1 as a cluster or strip sign [34]

дил значимость этих изменений, хотя вариабельность в различных исследованиях остаётся высокой. В работах, опубликованных в течение последнего года, исследователи предлагают инновационный подход – DTI-ALPS (diffusion tensor imaging along the perivascular space – диффузионно-тензорная визуализация вдоль периваскулярного пространства) – ориентированный на функцию лимфатической системы. В мета-анализе Shirbandi et al (2025) индекс ALPS достоверно отличался в группе пациентов с БП и контрольной группе (SMD: $-0,61$, 95 % CI: $-0,72$, $-0,50$, $p < 0,001$), что подчёркивает потенциал этого параметра как неинвазивного биомаркера диагностики и мониторинга заболевания [26]. При этом в более поздних критических обзорах было подчёркнуто, что несмотря на воспроизводимость групповых различий, диагностическая ценность DTI на индивидуальном уровне ограничена, а перспективы связаны в большей степени с применением расширенных моделей диффузии (например, DKI, NODDI) и мультицентровой стандартизацией методик [27].

В клинической практике МРТ дополняет DAT-визуализацию: при неясных случаях NM-MPT и методы оценки железа помогают подтвердить наличие нейродегенерации, а при дифференциальной диагностике с MSA и PSP диффузионные последовательности и высокопольные аппараты дают дополнительную информацию о характере повреждений.

ПЭТ/МРТ

Позитронно-эмиссионная томография, совмещённая с магнитно-резонансной томографией (ПЭТ/МРТ) является одной из наиболее перспективных технологий в диагностике БП. Она так же, как и ПЭТ/КТ, объединяет функциональную и структурную информацию в рамках одного исследования, но в отличие от ПЭТ/КТ, где анатомическая детализация ограничена, ПЭТ/МРТ позволяет одновременно оценивать дофаминергическую функцию и микроструктурные изменения в глубоких структурах мозга. Это особенно важно при БП, когда дегенеративный процесс затрагивает как функциональные параметры (дефицит транспортёров дофамина, снижение дофамина синтеза), так и морфологические маркеры (утрата нейромеланина, накопление железа в чёрной субстанции) [8].

Клинические исследования показывают, что ПЭТ/МРТ с использованием дофаминергических лигандов, например $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}$, позволяет выявлять раннюю дофаминергическую дисфункцию и параллельно фиксировать микроструктурные изменения в нигростриарном тракте [7]. В работе Shang et al (2021) было продемонстрировано, что гибридная ПЭТ/МРТ с $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}$ выявляет не только характерное снижение транспорта дофамина, но и сопутствующие изменения по данным диффузионной МРТ, что подчёркивает ценность мультипараметрического подхода для ранней диагностики и дифференциальной диагностики БП и атипичных паркинсонических синдромов [7].

Другие мультимодальные работы подтвердили, что комбинация ПЭТ с $[^{18}\text{F}]\text{DOPA}$ и NM-MPT позволяет напрямую связать депигментацию и накопление железа в чёрной субстанции (рис. 5) [28]. Кроме того, использование нейромеланин-чувствительной МРТ, совмещённой с ПЭТ с $[^{11}\text{C}]\text{-йохимбином}$, даёт возможность исследовать целостность голубого пятна и его адренергическую активность у пациентов с БП [29]. Недавний обзор Schröter et al (2025) также подчёркивает, что гибридная ПЭТ/МРТ открывает новые возможности для дифференциальной диагностики паркинсонических синдромов за счёт одновременного получения молекулярной, структурной и функциональной информации. Такой подход не только минимизирует ошибки пространственного совмещения изображений, но и улучшает качество сегментации. В исследовании, кроме того, отмечено, что ПЭТ/МРТ позволяет выявлять ранний и неоднородный дофаминергический дефицит в скорлупе, сопровождающийся нарушениями в интеграции нигростриарного тракта. Эти изменения напрямую коррелируют с ухудшением моторных функций, что подчёркивает ценность

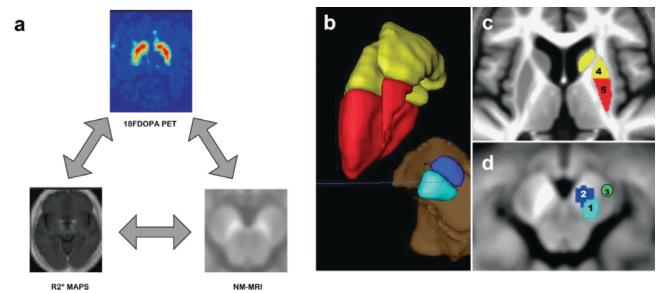


Рис. 5. а – Схематическое изображение трёх типов взаимосвязей, исследованных в работе: между NM-MPT, картами R2* и ПЭТ/КТ с $[^{18}\text{F}]\text{FDOPA}$. Данная схема приводится рядом с каждым анализом корреляций. б – Трёхмерная реконструкция левой чёрной субстанции и стриатума с их сегментацией. в – Аксиальный срез на уровне базальных ганглиев, полученный на среднем структурном изображении совокупной выборки (БП и здоровые контроли), с разграничением стриатума. Прекоммиссуральный стриатум показан жёлтым цветом (4), посткоммиссуральный – красным (5). Подобное разделение подтверждено анатомическими и функциональными данными. д – Аксиальные срезы на уровне среднего мозга на NM-MPT с разграничением чёрной субстанции, разделённой на латеральные отделы (1, голубой) и медиальные отделы (2, тёмно-синий) согласно нейропатологическим данным. Также обозначена ножка мозга (3, зелёный) [28]

Fig. 5. а – Diagram showing the three types of relationship explored in this study, between NM-MRI, R2* maps, and F-DOPA PET scan. This diagram will be recalled beside every correlation studied.

б – Tridimensional view of left SN and striatum with their divisions. в – Axial slice at the level of basal ganglia on the mean structural image of the whole population sample (PD+HC), showing striatum delineation. Precommissural striatum is depicted in yellow (4) and postcommissural striatum in red (5). This division is supported by anatomical and functional data [20, 87]. д – Axial slices at the level of midbrain on a NM-MRI, showing substantia nigra delineation, with division in lateral tiers (1, light blue) and medial tiers (2, dark blue), according to neuropathological data [79]. Cerebral peduncle is also delineated (3, green) [28]

мультипараметрического подхода для понимания патофизиологии БП и мониторинга прогрессирования заболевания [30].

К преимуществам ПЭТ/МРТ относятся отсутствие дополнительной лучевой нагрузки от КТ, возможность одновременного получения NM-МРТ, диффузионной МРТ и МР-спектроскопии, что расширяет потенциал комплексного анализа патологического процесса. Основные ограничения метода связаны с высокой стоимостью, ограниченной доступностью [8].

Таким образом, ПЭТ/МРТ в настоящее время занимает в основном исследовательскую нишу, однако накопленные данные подтверждают её потенциал как инструмента ранней диагностики, дифференциальной диагностики и мониторинга прогрессирования БП.

Заключение

Сравнительные характеристики основных РФП приведены в табл. 1.

Переносчик дофамина (DAT), локализованный на пресинаптических окончаниях дофаминергических нейронов, является ключевой мишенью молекулярной визуализации при БП. Измерение DAT с помощью ОФЭКТ/КТ или ПЭТ/КТ позволяет объективно зафиксировать снижение плотности пресинаптических терминалей в полосатом теле, что отражает дегенерацию nigrostriарного пути и служит надёжным биомаркером нейродегенерации.

Наиболее распространённым радиофармпрепаратом для DAT-ОФЭКТ/КТ является [¹²³I]FP-CIT (DaTSCAN). Он характеризуется высокой аффинностью к DAT и продемонстрировал высокую чувствительность и специфичность при дифференциальной диагностике БП от эссенциального тремора, лекарственного и сосудистого паркинсонизма [15].

В качестве альтернативы DaTSCAN также применяется [^{99m}Tc]TRODAT-1, который обладает несколько меньшей аффинностью и контрастностью изображения по сравнению с [¹²³I]FP-CIT, однако его диагностические характеристики сопоставимы, что подтверждено клиническими исследованиями [3, 6]. Доступность и экономичность делают TRODAT-1 особенно ценным в центрах, где использование ¹²³I ограничено.

Среди ПЭТ-препаратов особый интерес представляет [¹⁸F]FE-PE2I, обладающий высокой селективностью и оптимальными кинетическими свойствами. Прямые клинические сравнения показали, что [¹⁸F]FE-PE2I-ПЭТ обеспечивает более высокое пространственное разрешение и количественную точность по сравнению с [¹²³I]FP-CIT-SPECT [4, 5]. Использование радионуклида ¹⁸F (T_{1/2} = 109,7 мин) даёт возможность централизованного производства и широкого распространения препарата, что выгодно отличает его от ультракороткоживущих соединений на основе ¹¹C.

Помимо селективных DAT-лигандов, в диагностике БП применяются и другие ПЭТ-РФП. [¹⁸F]FDOPA отражает способность нейронов к синтезу дофамина, её используют для оценки функционального состояния дофаминергической системы. Снижение накопления [¹⁸F]FDOPA в полосатом теле является надёжным маркером пресинаптической дисфункции и хорошо коррелирует со стадией заболевания и выраженностью симптомов. В то же время FDOPA-ПЭТ менее специфична, чем DAT-визуализация, поскольку отражает не только транспортную активность, но и общую метаболическую динамику дофаминергических нейронов [31].

Другим не менее важным инструментом является [¹⁸F]-FDG, который оценивает мозговой метаболизм глюкозы. Он не отражает напрямую дофаминергическую функцию, однако позволяет выявлять характерные для БП паттерны гипо- и гиперметаболизма, такие как снижение активности в лобно-теменных зонах при сохранении активности в мозжечке и таламусе. [¹⁸F]FDG доказал свою эффективность для идентификации метаболических паттернов, что ценно при дифференциальной диагностике БП и атипичных паркинсонических синдромов [32].

Ещё одним важным направлением является изучение норадренергической системы. Недавние работы показали, что [¹¹C]-йохимбин, селективный лиганд α₂-адренорецепторов, позволяет *in vivo* оценивать целостность голубого пятна и норадренергических путей. Совмещение этого подхода с нейромеланин-чувствительной МРТ продемонстрировало перспективность метода для выявления ранних изменений, не отражённых в дофаминергической системе, и может стать

Таблица 1

Радиофармпрепараты для молекулярной визуализации при болезни Паркинсона
Radiopharmaceuticals for molecular imaging in Parkinson's disease

РФП	Мишень	Метод	T _{1/2}	Чувствительность / специфичность	Особенности применения
[¹²³ I]FP-CIT (DaTSCAN)	DAT	SPECT	13,2 ч	~95% / ~93%	«Золотой стандарт» SPECT; дифференциация БП и эссенциального тремора; требует йодной блокады
[^{99m} Tc]TRODAT-1	DAT	SPECT	6,04 ч	87–94% / 85–90%	Более доступный (генератор ^{99m} Tc), применяется в Азии и Лат. Америке; контрастность ниже, чем у DaTSCAN
[¹⁸ F]FE-PE2I	DAT	PET	109,7 мин	~94% / ~100%	Высокая селективность, лучшее разрешение; перспективен для ранней диагностики
[¹¹ C]PE2I	DAT	PET	20,3 мин	Высокая (ограниченные данные)	Отличная кинетика, но нужен циклотрон «на месте»
[¹⁸ F]FDOPA	AADC (синтез дофамина)	PET	109,7 мин	Высокая специфичность; чувствительность варьирует	Ценен для раннего БП; иногда менее чувствителен при клинически неясных случаях
[¹⁸ F]FDG	Метаболизм глюкозы	PET	109,7 мин	–	Характерные паттерны гипометаболизма; ценен в дифференциальной диагностике
[¹⁸ F]AV-133	VMAT2	PET	109,7 мин	Высокая	Отражает целостность nigrostriарных терминалей; перспективен для мониторинга прогрессирования
[¹¹ C]Yohimbine	α ₂ -адренорецепторы (LC)	PET	20,3 мин	Высокая (первые данные)	Оценка целостности голубого пятна и норадренергической системы; используется в исследовательских целях

дополнением к традиционным радиофармпрепаратам при БП [29].

Таким образом, на сегодняшний день существует широкий спектр радиофармпрепаратов для радионуклидной визуализации при болезни Паркинсона, различающихся по мишеням и методам получения диагностической информативности. При наличии доступа к современным технологиям ПЭТ/КТ с [¹⁸F]FE-PE2I следует рассматривать как наиболее перспективный метод визуализации DAT. Тем не менее, ОФЭКТ/КТ с [¹²³I]FP-CIT

сохраняет ведущую роль в рутинной диагностике благодаря своей доступности и валидированности, а [^{99m}Tc] TRODAT-1 остаётся важной альтернативой для стран и регионов с ограниченными ресурсами. [¹⁸F]-FDOPA и [¹⁸F]-FDG, хотя и не являются прямыми методами DAT-визуализации, но предоставляют дополнительную ценную информацию о функциональном состоянии дофаминергической системы и метаболических паттернах мозга, усиливая комплексную оценку БП.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

- Su D., Cui Y., He C., Yin P., Bai R., Zhu J., Lam J.S.T., Zhang J., Yan R., Zheng X., Wu J., Zhao D., Wang A., Zhou M., Feng T. Projections for Prevalence of Parkinson's Disease and its Driving Factors in 195 Countries and Territories to 2050: Modelling Study of Global Burden of Disease Study 2021. *BMJ*. 2025 Mar 5;388:e080952. Doi: 10.1136/bmj-2024-080952. PMID: 40044233; PMCID: PMC11881235/.
- Dentamaro V., Impedovo D., Musti L., et al. Enhancing Early Parkinson's Disease Detection through Multimodal Deep Learning and Explainable AI: Insights from the PPMI Database. *Sci Rep*. 2024;14:20941. Doi: 10.1038/s41598-024-70165-4.
- Singhal T., Narayan M.L., Manchanda R., Singh P., Dhar M., Tiwari A., Kumar N. Reviewing the Diagnostic Performance of ^{99m}Tc-TRODAT-1 Imaging in Distinguishing Idiopathic Parkinson's Disease from Parkinson-Plus Syndromes. *World J Nucl Med*. 2024 Jul 4;23;4:242-249. Doi: 10.1055/s-0044-1787995. PMID: 39677345; PMCID: PMC11637641.
- Marner L., Korsholm K., Anderberg L., et al. [¹⁸F]FE-PE2I PET is a Feasible Alternative to [¹²³I]FP-CIT SPECT for Dopamine Transporter Imaging in Clinically Uncertain Parkinsonism. *EJNMMI Res*. 2022;12:56. Doi: 10.1186/s13550-022-00930-x.
- Jakobson M.O., Axelsson S., Jonasson J., L. et al. (2018). Dopamine Transporter Imaging with [¹⁸F]FE-PE2I PET and [¹²³I]FP-CIT SPECT – a Clinical Comparison. *EJNMMI Res*. 2018;8:100. Doi: 10.1186/s13550-018-0450-0.
- Fabiani G., Camargo C.H.F., Filho R.M., Froehner G.S., Teive H.A.G. Evaluation of Brain SPECT with ^{99m}Tc-TRODAT-1 in the Differential Diagnosis of Parkinsonism. *Parkinsons Dis*. 2022 Mar 8;2022:1746540. Doi: 10.1155/2022/1746540. PMID: 35300121; PMCID: PMC8923776.
- Shang S., Li D., Tian Y., et al. Hybrid PET-MRI for Early Detection of Dopaminergic Dysfunction and Microstructural Degradation Involved in Parkinson's Disease. *Commun Biol*. 2021;4:1162. Doi: 10.1038/s42003-021-02705-x.
- Leung I.H.K., Strudwick M.W. A Systematic Review of the Challenges, Emerging Solutions and Applications, and Future Directions of PET/MRI in Parkinson's Disease. *EJNMMI Rep*. 2024;8:3. Doi: 10.1186/s41824-024-00194-9.
- Hartono S., Chen R.C., Welton T., Tan A.S., Lee W., Teh P.Y., Chen C., Hou W., Tham W.P., Lim E.W., Prakash K.M., Shih Y.C., Lee K.J., Tan L.C.S., Tan E.K., Chan L.L. Quantitative Iron-Neuromelanin MRI Associates with Motor Severity in Parkinson's Disease and Matches Radiological Disease Classification. *Front Aging Neurosci*. 2023 Nov 27;15:1287917. Doi: 10.3389/fnagi.2023.1287917. PMID: 38090717; PMCID: PMC10711072/.
- Wang J., Xue L., Jiang J., et al. Diagnostic Performance of Artificial Intelligence-Assisted PET Imaging for Parkinson's Disease: a Systematic Review and Meta-Analysis. *Npj Digit. Med*. 2024;7:17. Doi: 10.1038/s41746-024-01012-z.
- Leung K.H., Rowe S.P., Pomper M.G., et al. A Three-Stage, Deep Learning, Ensemble Approach for Prognosis in Patients with Parkinson's Disease. *EJNMMI Res*. 2021;11:52. Doi: 10.1186/s13550-021-00795-6.
- Albin R.L., Dauer W.T., Burke R.E., Parkinson Disease. Ed. Daroff R.B., Jankovic J., Mazziotta J.C., Pomeroy S.L. Bradley and Daroff's Neurology in Clinical Practice. 8th Vol.2. Oxford, Oxford University Press, 2023. P. 2151-2179. Doi: 10.1093/med/9780190942872.001.0001.
- Hustad E., Aasly J.O. Clinical and Imaging Markers of Prodromal Parkinson's Disease. *Front Neurol*. 2020 May 8;11:395. Doi: 10.3389/fneur.2020.00395. PMID: pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32457695/; PMCID: PMC7225301.
- Du X., Zhao H., Li Y., et al. The Value of PET/CT in the Diagnosis and Differential Diagnosis of Parkinson's Disease: a Dual-Tracer Study. *Npj Parkinsons Dis*. 2024;10:171. Doi: 10.1038/s41531-024-00786-z.
- Morbelli S., Esposito G., Arbizu J., et al. EANM Practice Guideline/SNMMI Procedure Standard for Dopaminergic Imaging in Parkinsonian Syndromes 1.0. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2020;47:1885–1912. Doi: 10.1007/s00259-020-04817-8.
- Huang W., Jiang H., Du Y., et al. Transfer Learning-Based Attenuation Correction in ^{99m}Tc-TRODAT-1 SPECT for Parkinson's Disease Using Realistic Simulation and Clinical Data. *EJNMMI Phys*. 2025;12:43. Doi: 10.1186/s40658-025-00756-1.
- Houot M., Arnaud, Mongin S., et al. Relevance of 123I-FP-CIT SPECT Prescriptions for the Diagnosis of Parkinsonian Syndromes. *Sci Rep*. 2024;14:25088. doi.org/10.1038/s41598-024-73777-y.
- Wallert E., Letort E., van der Zant F., et al. Comparison of [¹⁸F]-FDOPA PET and [¹²³I]-FP-CIT SPECT Acquired in Clinical Practice for Assessing Nigrostriatal Degeneration in Patients with a Clinically Uncertain Parkinsonian Syndrome. *EJNMMI Res*. 2022;12:68. Doi: 10.1186/s13550-022-00943-6.
- Beauchamp L.C., Dore V., Villemagne V.L., Xu S., Finkelstein D., Barnham K.J., Rowe C. Using ¹⁸F-AV-133 VMAT2 PET Imaging to Monitor Progressive Nigrostriatal Degeneration in Parkinson Disease. *Neurology*. 2023 Nov 27;101;22:e2314-e2324. Doi: 10.1212/WNL.000000000207748. Erratum in: *Neurology*. 2024 Jul 9;103;1:e209596. Doi: 10.1212/wnl.000000000207748. PMID:37816639; PMCID: PMC10727223/.
- Xiang J., Zhang Z., Wu S., et al. Positron Emission Tomography Tracers for Synucleinopathies. *Mol Neurodegeneration*. 2025;20:1. Doi: 10.1186/s13024-024-00787-9.
- Chougar L., Pyatigorskaya N., Degos B., Grabli D., Lehericy S. The Role of Magnetic Resonance Imaging for the Diagnosis of Atypical Parkinsonism. *Front Neurol*. 2020 Jul 17;11:665. Doi: 10.3389/fneur.2020.00665. PMID:32765399; PMCID:PMC7380089/.
- He N., Chen Y., LeWitt P.A., Yan F., Haacke E.M. Application of Neuromelanin MR Imaging in Parkinson Disease. *J Magn Reson Imaging*. 2023 Feb;57;2:337-352. Doi: 10.1002/jmri.28414. Epub 2022 Aug 26. PMID: 36017746; PMCID: PMC10086789.
- Liu Q., Wang P., Liu C., Xue F., Wang Q., Chen Y., Hou R., Chen T. An Investigation of Neuromelanin Distribution in Substantia Nigra and Locus Coeruleus in Patients with Parkinson's Disease Using Neuromelanin-Sensitive MRI. *BMC Neurol*. 2023 Aug 14;23;1:301. Doi: 10.1186/s12883-023-03350-z. PMID: 37580712; PMCID: PMC10424360.
- Madelung C.F., Løkkegaard A., Fuglsang S.A., et al. High-Resolution Mapping of Substantia Nigra in Parkinson's Disease Using 7 tesla MRI. *NPJ Parkinsons Dis*. 2025;11:113. Doi: 10.1038/s41531-025-00972-7.
- Tseriotis V.S., Eleftheriadou K., Mavridis T., Konstantis G., Falkenburger B., Arnaoutoglou M. Is the Swallow Tail Sign

- a Useful Imaging Biomarker in Clinical Neurology? A Systematic Review. *Mov Disord Clin Pract.* 2025 Feb;12;2:134-147. Doi: 10.1002/mdc3.14304. Epub 2024, Dec 17. PMID: 39688317; PMCID: PMC11802665.
26. Shirbandi K., Jafari M., Mazaheri F., Tahmasbi M. Diffusion Tensor Imaging Along the Perivascular Space Is a Promising Imaging Method in Parkinson's Disease: a Systematic Review and Meta-Analysis Study. *CNS Neurosci Ther.* 2025 May;31;5:e70434. Doi: 10.1111/cns.70434. PMID: 40376934; PMCID: PMC12082281.
27. Bergamino M., Keeling E.G., Mishra V.R., Stokes A.M., Walsh R.R. Assessing White Matter Pathology in Early-Stage Parkinson Disease Using Diffusion MRI: A Systematic Review. *Front Neurol.* 2020 May 14;11:314. Doi: 10.3389/fneur.2020.00314. PMID: 32477235; PMCID: PMC7240075.
28. Depierreux F., Parmentier E., Mackels L., et al. Parkinson's Disease Multimodal Imaging: F-DOPA PET, Neuromelanin-Sensitive and Quantitative Iron-Sensitive MRI. *NPJ Parkinsons Dis.* 2021;7:57. Doi: 10.1038/s41531-021-00199-2.
29. Laurencin Ch., Lancelot S., Brosse S., Mérida I., Redouté J., Greusard E., Lamberet L., Liotier V., Le Bars D., Costes N., Thobois S., Boulinguez P., Ballanger B. Noradrenergic Alterations in Parkinson's Disease: a Combined ¹¹C-Yohimbine PET/Neuromelanin MRI study. *Brain.* 2024;147;4:1377-1388. Doi: 10.1093/brain/awad338.
30. Schröter N., Groppa S., Rijntjes M., et al. Neuroimaging in Advanced Parkinson's Disease: Insights into Pathophysiology, Biomarkers, and Personalized therapies. *J Neural Transm.* 2025 Nov;132;11:1655-1664. Doi: 10.1007/s00702-025-02942-y.
31. Stormezand G.N., de Meyer E., Koopmans K.P., Brouwers A.H., Luurtsema G., Dierckx RAJO. Update on the Role of [¹⁸F]FDOPA PET/CT. *Semin Nucl Med.* 2024 Nov;54;6:845-855. Doi: 10.1053/j.semnuclmed.2024.09.004. Epub 2024, Oct 9. PMID: 39384519.
32. Houssein N.J., Henriksen A.C., Hejl A.M., et al. Diagnostic Accuracy of Cerebral [¹⁸F]FDG PET in Atypical Parkinsonism. *EJNMMI Res.* 2023;13:74. Doi: 10.1186/s13550-023-01025-x.
33. Iwabuchi Y., Nakahara T., Kameyama M., et al. Impact of the Cerebrospinal Fluid-Mask Algorithm on the Diagnostic Performance of ¹²³I-Ioflupane SPECT: an Investigation of Parkinsonian Syndromes. *EJNMMI Res.* 2019;9:85. Doi: 10.1186/s13550-019-0558-x.
34. Cheng Z., He N., Huang P., Li Y., Tang R., Sethi S.K., Ghassaban K., Yerramsetty K.K., Palutla V.K., Chen S., Yan F., Haacke E.M. Imaging the Nigrosome 1 in the Substantia Nigra Using Susceptibility Weighted Imaging and Quantitative Susceptibility Mapping: an Application to Parkinson's Disease. *Neuroimage Clin.* 2020;25:102103. Doi: 10.1016/j.nicl.2019.102103. Epub 2019, Nov 20. PMID: 31869769; PMCID: PMC6933220.
35. *Tannaхов А.А., Попова Т.Е.* Роль магнитно-резонансной томографии в дифференциальной диагностике болезни Паркинсона // Российский неврологический журнал. 2023. Т.28. №1. С. 5-12 [Tappakhov A.A., Popova T.E. The Role of Magnetic Resonance Imaging in the Differential Diagnosis of Parkinson's Disease. *Rossiyskiy Nevrologicheskiy Zhurnal = Russian Neurological Journal.* 2023;28;1:5-12. (In Russ.)]. Doi: 10.30629/26587947-2023-28-1-5-12.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 20.02.2026. Принята к публикации: 25.03.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 20.02.2026. Accepted for publication: 25.03.2026.