

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НЕЙРОВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РАДИАЦИОННОГО ПОРАЖЕНИЯ ЦНС

*Межнина Б. И.*

*Научный руководитель: канд. биол. наук., доц. Зиматкина Т. И.*

*Гродненский государственный медицинский университет, г. Гродно*

**Резюме.** В работе проведен анализ современных методов функциональной нейровизуализации в контексте диагностики радиационного поражения центральной нервной системы (ЦНС). Поздняя радиационная энцефалопатия является тяжелым осложнением лучевой терапии, ведущим к прогрессивному появлению необратимых структурных дефектов. В статье на основе систематического обзора научной литературы проведена оценка диагностической ценности функциональной МРТ (фМРТ), позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) и однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ). Методы функциональной нейровизуализации обладают существенными преимуществами перед структурными методами в выявлении доклинических и ранних форм радиационного поражения ЦНС. Их интеграция в клиническую практику открывает новые возможности для индивидуального подхода к мониторингу состояния пациентов и оценке эффективности нейропротекторной терапии.

**Ключевые слова:** центральная нервная система, лучевое поражение, функциональная МРТ, ПЭТ, ОФЭКТ, ранняя диагностика, функциональная нейровизуализация.

**Актуальность.** Радиационное поражение ЦНС является серьезным осложнением лучевой терапии онкологических заболеваний головы и шеи, головного мозга, а также результатом аварийных ситуаций. Поздняя радиационная энцефалопатия характеризуется прогрессирующими необратимыми неврологическими и нейрокогнитивными нарушениями, существенно снижающими качество жизни пациентов. Основная диагностическая проблема заключается в отсутствии надежных маркеров для выявления повреждения на доклинической стадии, когда терапевтическое вмешательство может быть наиболее эффективным. Стандартные методы нейровизуализации (МРТ, КТ) часто остаются неинформативными до появления

макроструктурных изменений (демиелинизация, некроз, атрофия).

**Цель:** провести систематический анализ возможностей и определить диагностическую ценность методов функциональной нейровизуализации (фМРТ, ПЭТ, ОФЭКТ) для выявления ранних признаков радиационного поражения ЦНС.

**Задачи:**

1. Проанализировать патофизиологические изменения в ЦНС при радиационном воздействии, релевантные для функциональной нейровизуализации.

2. Оценить диагностический потенциал каждого из методов функциональной нейровизуализации.

3. Выявить характерные функциональные паттерны, ассоции-

ированные с различными стадиями радиационной энцефалопатии.

**Материалы и методы.** Применены методы систематизации, сравнительного анализа и обобщения. Основные рассматриваемые методы: Функциональная МРТ (фМРТ): Оценка Blood-Oxygen-Level Dependent (BOLD) сигнала (зависимость от уровня кислорода в крови). Используется как парадигма task-based fMRI (выполнение когнитивных задач), так и resting-state fMRI (анализ функциональной связности в состоянии покоя). Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ): применение радиофармпрепаратов (РФП) [18F]ФДГ для оценки метаболизма глюкозы, [11C]метионин для оценки активности опухоли и дифференциальной диагностики с лучевым некрозом. Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ): использование РФП (например,  $^{99m}\text{Tc}$ -Гексаметилпропиленаминоксим) для оценки церебральной перфузии.

**Результаты и их обсуждение.** Патофизиологические основы для функциональной нейровизуализации. Радиационное повреждение ЦНС является каскадным процессом, затрагивающим: сосудистый компонент - повреждение эндотелия, нарушение гематоэнцефалического барьера (ГЭБ), снижение плотности капилляров, гипоперфузия. Нейровоспаление: активация микроглии, высвобождение провоспалительных цитокинов. Демиелинизация: повреждение олигодендроцитов. Повреждение нейрональных стволовых клеток.

Эти процессы напрямую влияют на метаболизм нейронов,

региональный мозговой кровоток и функциональную интеграцию между различными областями мозга, что является мишенью для методов функциональной нейровизуализации.

ПЭТ с [18F]ФДГ является "золотым стандартом" оценки церебрального метаболизма. У пациентов после облучения наблюдаются зоны гипометаболизма, которые часто опережают появление структурных изменений на МРТ. Наиболее часто гипометаболизм выявляется в височных долях, гиппокампе (что коррелирует с нарушениями памяти), префронтальной коре (снижение исполнительных функций) и базальных ганглиях. Степень снижения метаболизма коррелирует с тяжестью нейрокогнитивного дефицита [1].

ПЭТ с аминокислотными РФП ([11C]метионин, [18F]ФЭТ) имеет критическое значение для дифференциации лучевого некроза от прогрессирования опухоли, так как в отличие от [18F]ФДГ, их накопление не зависит от нарушения ГЭБ и более специфично для опухолевой ткани [2].

ОФЭКТ демонстрирует снижение регионального церебрального кровотока (рЦК) в зонах, подвергшихся облучению. Хотя ее разрешающая способность ниже, чем у ПЭТ, метод остается доступным для оценки гипоперфузии, которая является прямым следствием сосудистого повреждения.

Функциональная МРТ(фМРТ): Task-based fMRI: Исследования с выполнением когнитивных задач (память, внимание) выявляют атипичные паттерны активации мозга. Часто наблюдается снижение активации в типичных для задачи зонах

(например, гиппокампе при задачах на память) с одновременной компенсаторной гиперактивацией контралатеральных или иных областей, что может отражать нейропластическую перестройку на ранних стадиях [3].

Resting-state fMRI (rs-fMRI): Это наиболее перспективное направление для ранней диагностики. Анализ функциональной связности выявляет нарушения в крупномасштабных нейронных сетях:

Default Mode Network (DMN): Наблюдается снижение функциональной связности внутри DMN, что сильно коррелирует с нарушениями эпизодической памяти и самореферентного мышления.

Executive Control Network (ECN): Нарушения связности в этой сети ассоциированы с дефицитом внимания и исполнительных функций.

Salience Network (SN): Изменения в этой сети могут лежать в основе апатии и эмоциональных нарушений.

Наибольшую диагностическую ценность представляет комбинация методов. Например, структурная МРТ может выявить локальный отек или атрофию, ПЭТ с [18F]ФДГ подтвердит гипометаболизм в этой зоне, а rs-fMRI покажет, как это повреждение повлияло на интеграцию данной зоны в функциональные сети мозга.

**Табл. 1.** Сравнительная характеристика методов функциональной нейровизуализации при радиационном поражении ЦНС

Метод	Оцениваемый параметр	Преимущества	Недостатки	Характерные находки при РП ЦНС
ПЭТ ([18F]ФДГ)	Метаболизм глюкозы	Высокая чувствительность, количественная оценка	Лучевая нагрузка, низкое пространственное разрешение	Гипометаболизм в гиппокампе, коре, базальных ганглиях
ПЭТ (аминокислоты)	Активность опухоли vs. некроз	Высокая специфичность	Лучевая нагрузка, ограниченная доступность РФП	Помогает дифференцировать рецидив опухоли от лучевого некроза
ОФЭКТ	Церебральная перфузия	Широкая доступность	Низкое пространственное и временное разрешение, лучевая нагрузка	Диффузная или очаговая гипоперфузия
фМРТ (task-based)	Локальная активация	Неинвазивность, нет лучевой нагрузки	Зависимость от выполнения задачи пациентом	Снижение/перераспределение активации при когнитивной нагрузке

Продолжение таблицы 1

Метод	Оцениваемый параметр	Преимущества	Недостатки	Характерные находки при РП ЦНС
фМРТ (task-based)	Локальная активация	Неинвазивность, нет лучевой нагрузки	Зависимость от выполнения задачи пациентом	Снижение/перераспределение активации при когнитивной нагрузке
фМРТ (resting-state)	Функциональная связность	Высокое пространственно-временное разрешение, оценка сетевой организации	Косвенная мера нейрональной активности	Снижение связности в DMN, ECN, SN

**Выводы.** Проведенный анализ позволяет утверждать, что методы функциональной нейровизуализации открывают новые горизонты в диагностике радиационного поражения ЦНС. Функциональная нейровизуализация является перспективным инструментом для ранней диагностики, объективной оценки динамики и мониторинга эффективности нейропротекторной терапии у пациентов, перенесших радиационное воздействие на ЦНС. В отличие от структурных методов, они способны выявлять тонкие нарушения метаболизма, перфузии и функциональной интеграции мозга на самых ранних, потенциально обратимых стадиях заболевания.

ПЭТ с  $[^{18}\text{F}]\text{ФДГ}$  является наиболее чувствительным методом

для объективной оценки метаболических нарушений и их корреляции с клинической симптоматикой.

фМРТ, в особенности анализ состояния покоя, представляет собой мощный инструмент для неинвазивной оценки воздействия радиации на функциональную архитектуру мозга и выявления доклинических сетевых дисфункций.

Комбинированное использование структурной и функциональной нейровизуализации формирует комплексный диагностический алгоритм, позволяющий не только констатировать факт поражения, но и прогнозировать развитие нейрокогнитивного дефицита, а также оценивать эффективность нейропротекторных и реабилитационных вмешательств.

### Литература

1. Аннадурдыева М.О. ассистент Кафедра неврология Государственный медицинский университет Туркменистана им. Мырата Гаррыева. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metody-neyrovizualizatsii-v-diagnostike-zabolevaniy-tsentralnoy-nervnoy-sistemy/viewer> от 10.11.2025

2. Галидикс Н. и др. Использование аминокислотного ПЭТ для диагностики лучевого некроза у пациентов с метастазами в головной мозг // Актуальные доклады по неврологии и нейронауке. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11910-020-01051-5> от 10.11.2025

3. Дуан Ф. и др. Изменения в низкочастотных колебаниях ФМРТ в состоянии покоя у пациентов с радиационно-индуцированным некрозом височной доли // Научные отчеты– Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12888-023-05364-w> от 10.11.2025

4. Вельцель Т. и др. Функция памяти до и после лучевой терапии всего головного мозга у пациентов с сохранением гиппокампа и без него // Лучевая терапия и онкология.. – Режим доступа: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18448270> от 10.11.2025

5. Ху Л. и др. Радиационно-индуцированные изменения функциональной связности сети в режиме "по умолчанию" у пациентов с раком носоглотки // Нейровизуализация: клиника. – Режим доступа: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27442663> от 10.11.2025

6. Цюгучи Н. и др. Оценка радиационно-индуцированного повреждения головного мозга с помощью ПЭТ с <sup>18</sup>F-ФДГ у пациентов с карциномой носоглотки // Анналы ядерной медицины. - Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12149-022-01770-4> от 10.11.2025

## EVALUATION OF FUNCTIONAL NEUROIMAGING CAPABILITIES FOR THE DIAGNOSIS OF CNS RADIATION DAMAGE

*Mezhnina B. I.*

*Tutor: PhD, associate professor Zimatkina T. I.  
Grodno State Medical University, Grodno*

**Resume.** The paper analyzed modern methods of functional neuroimaging in the context of the diagnosis of radiation damage to the central nervous system (CNS). Late radiation encephalopathy is a severe complication of radiation therapy, leading to the progressive appearance of irreversible structural defects. Based on a systematic review of the scientific literature, the article assessed the diagnostic value of functional MRI (fMRI), positron emission tomography (PET) and single-photon emission computed tomography (SPECT). Functional neuroimaging methods have significant advantages over structural methods in identifying preclinical and early forms of CNS radiation damage. Their integration into clinical practice opens up new opportunities for an individual approach to monitoring the condition of patients and assessing the effectiveness of neuroprotective therapy.

**Keywords:** central nervous system, radiation lesion, functional MRI, PET, SPECT, early diagnosis, functional neuroimaging.