

А.В. Петрякова^{1,2}, Л.А. Чипига^{1,3,4}, М.С. Тлостанова³, А.А. Иванова³, Д.А. Важенина³,
А.А. Станжевский³, Д.В. Рыжкова⁴, В.Ю. Сухов⁵, И.В. Бойков⁶, Ю.Н. Припорова⁶,
А.А. Балабанова⁷, Д.В. Захс⁷, Г.М. Митусова², Е.М. Зыков⁸, А.И. Пронин⁹, О.Д. Рыжова⁹

МЕТОДИКА ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЭТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ ПАЦИЕНТОВ

¹Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. проф. П.В. Рамзаева
Роспотребнадзора, Санкт-Петербург

²Городская больница № 40 Курортного административного района Санкт-Петербурга, Сестрорецк

³Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. академика А.М. Гранова
Минздрава РФ, Санкт-Петербург

⁴Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Минздрава РФ, Санкт-Петербург

⁵Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС РФ, Санкт-Петербург

⁶Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова Минобороны РФ, Санкт-Петербург

⁷Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой РАН, Санкт-Петербург

⁸Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи
(онкологический), Санкт-Петербург, пос. Песочный

⁹Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава РФ, Москва

Контактное лицо: Анастасия Валерьевна Петрякова, e-mail: nastya.petryakova@gmail.com

РЕФЕРАТ

Цель: Разработка методики экспертной оценки качества ПЭТ-изображений как дополнительного инструмента к тестам контроля качества для получения точных, сопоставимых и воспроизводимых результатов исследований, а также оценка изображений на ее основе в разных ПЭТ-отделениях.

Материал и методы: В работе было отобрано 60 ПЭТ-изображений (без КТ) пациентов, прошедших ПЭТ/КТ-исследование всего тела с ¹⁸F-ФДГ, на 12 ПЭТ/КТ-аппаратах из 9 медицинских организаций. Экспертная оценка качества изображений была проведена с помощью анкетирования врачей-экспертов. Каждый врач-эксперт оценивал изображения по трем критериям качества: чёткость, артефакты и общее качество изображения с использованием пятибалльной шкалы и заполнял анкету. Всего в анкетировании приняли участие 28 врачей-экспертов из восьми медицинских организаций, работающие в области радиологии от 1 года до 32 лет. Полученные результаты экспертной оценки были проанализированы с помощью статистических методов для выявления взаимосвязей с факторами, влияющими на качество изображения: настройки оборудования, параметры протоколов сканирования и реконструкции, методики проведения исследования и факторами субъективности, влияющими на результат оценки: стаж работы и условия (место) работы врачей-экспертов, а также для определения минимально необходимого количества врачей-экспертов для проведения экспертной оценки качества изображений.

Результаты: Изображения, полученные на 8 из 12 аппаратах, имели средний балл более 4 (хорошо) по всем критериям. Аппараты с наименьшими баллами обладали устаревшими или нетипичными настройками и параметрами реконструкции. Определены взаимосвязи между оценкой качества изображений и параметрами сканирования (время сканирования одной кровати, произведение активности и времени сканирования одной кровати) и методиками проведения исследования (вводимая активность, время между введением активности и сканированием). Результаты экспертной оценки качества изображений зависели от стажа и условий работы врача-эксперта.

Заключение: Разработана и представлена методика экспертной оценки качества ПЭТ-изображений пациентов, основанная на анкетировании врачей-экспертов. Результаты продемонстрировали, что данная методика имеет потенциал для сопоставления ПЭТ-изображений, полученных на разных протоколах сканирования и реконструкции, может быть применима при оптимизации методик проведения исследования, а также для выявления устаревших и нетипичных настроек аппаратов. Экспертная оценка качества ПЭТ-изображений должна включать мнение не менее шести врачей-экспертов с различным опытом работы из нескольких отделений.

Ключевые слова: позитронная эмиссионная томография, экспертная оценка, качество диагностики, контроль качества изображения

Для цитирования: Петрякова А.В., Чипига Л.А., Тлостанова М.С., Иванова А.А., Важенина Д.А., Станжевский А.А., Рыжкова Д.В., Сухов В.Ю., Бойков И.В., Припорова Ю.Н., Балабанова А.А., Захс Д.В., Митусова Г.М., Зыков Е.М., Пронин А.И., Рыжова О.Д. Методика экспертной оценки качества ПЭТ-изображений пациентов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 1. С. 78–85. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-1-78-85

A.V. Petryakova^{1,2}, L.A. Chipiga^{1,3,4}, M.S. Tlostanova³, A.A. Ivanova³, D.A. Vazhenina³,
A.A. Stanzhevsky³, D.V. Ryzhkova⁴, V.Yu. Sukhov⁵, I.V. Boikov⁶, Yu.N. Priporova⁶,
A.A. Balabanova⁷, D.V. Zakhs⁷, G.M. Mitusova², E.M. Zykov⁸, A.I. Pronin⁹, O.D. Ryzhova⁹

Method of Experts' Quality Evaluation of the PET Images of the Patients

¹P.V. Ramzaev Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene, Saint Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Hospital No 40 of the Resort District, Saint Petersburg, Russia

³A.M. Granov Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies, Saint Petersburg, Russia

⁴V.A. Almazov National Medical Research Center, Saint Petersburg, Russia

⁵A.M. Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, Saint Petersburg, Russia

⁶S.M. Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

⁷N.P. Bechtereva Institute of Human Brain, Saint Petersburg, Russia

⁸Saint Petersburg Clinical Research Center of Specialized Type of Care (Oncology), Saint Petersburg, Russia

⁹N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

Contact person: A.V. Petryakova

ABSTRACT

Purpose: To develop the method of experts' quality evaluation of the PET images as an additional quality control method for accurate, comparable, and reproducible PET diagnostics results, and to conduct image quality evaluation in different PET departments used this method. **Material and methods:** 60 PET images (without CT) of the patients who underwent whole body PET/CT with ¹⁸F-FDG were collected from 12 PET/CT scanners in 9 PET departments. Experts' quality evaluation was conducted with questioning of the experts. Each expert evaluated the image quality by five-point scale and filled out the special form which include three image quality criteria: image clarity, artefacts, and general image quality. There were 28 experts from 8 different PET departments who have work experience in radiology from 1 to 32 years. The results of experts' quality evaluation of the PET images were examined for correlations with parameters of acquisition and reconstruction protocols, examination methods. The results were also examined for dependance of subjective factors such as work experience and work conditions of experts. The minimum required number of experts were defined. The results were analyzed used statistical methods. **Results:** The PET images obtained by 8 PET/CT scanners had mean quality value more than 4 points (good quality). PET/CT scanners, which had the lowest quality value, have the obsolete or unusual settings and reconstruction parameters. The correlations between experts' quality evaluation of the PET images and acquisition parameters (acquisition time per bed, multiplication of injected activity and acquisition time per bed), and examination methods (injected activity and uptake time) were established. The results of experts' quality evaluation of the PET images were dependent on work experience and work conditions of experts.

Conclusion: The method of experts' quality evaluation of the PET images of the patients based on the questioning of the experts working in PET was developed and demonstrated in the current study. The results showed this method has the potential to compare the PET images obtained by different acquisition and reconstruction protocols, and it can be applied during the optimization of examination method and for the determination of obsolete and unusual settings of PET/CT. Experts' evaluation of the PET images should include the opinion of at least six experts with different work experience in PET from several PET departments.

Key words: *positron emission tomography, experts' evaluation, diagnostics quality, image quality control*

For citation: Petryakova AV, Chipiga LA, Tlostanova MS, Ivanova AA, Vazhenina DA, Stanzhevsky AA, Ryzhkova DV, Sukhov VYu, Boikov IV, Priporova YuN, Balabanova AA, Zakhs DV, Mitusova GM, Zykov EM, Pronin AI, Ryzhova OD. Method of Experts' Quality Evaluation of the PET Images of the Patients. Medical Radiology and Radiation Safety. 2023;68(1):78–85. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-1-78-85

Введение

Позитронная эмиссионная томография (ПЭТ) является современным методом радионуклидной диагностики, который за последние несколько десятилетий в сочетании преимущественно с рентгеновской компьютерной томографией (ПЭТ/КТ) успешно развивался и совершенствовался [1]. Метод ПЭТ дает возможность интерпретации диагностических результатов не только качественно, но и количественно путем оценки распределения радиофармацевтического лекарственного препарата (РФЛП) в организме пациента. Это позволяет эффективно использовать ПЭТ в первую очередь в онкологии для первичного диагностирования заболевания, включая высокую степень выявления новообразований на ранних стадиях, стадирования и наблюдения динамики лечения [2, 3]. Одним из наиболее распространенных РФЛП для ПЭТ является фтордезоксиглюкоза, меченная радионуклидом ¹⁸F (¹⁸F-ФДГ), что связано с высокой степенью эффективности определения повышенного метаболизма глюкозы в злокачественных новообразованиях, а также высокой доступностью доставки данного радио-

нуклида в отделения, которые не обладают собственным производством РФЛП [4].

Применение количественных показателей в ПЭТ-диагностике ставит вопросы о точности, сопоставимости и воспроизводимости получаемых результатов исследования [3, 5, 6]. Поэтому необходимо уделять должное внимание качеству изображения и факторам, влияющим на него: настройкам и калибровке оборудования, выбору параметров протоколов сканирования и реконструкции, методикам проведения исследования (вводимая активность, время ожидания между введением активности и сканированием), а также процедурам контроля качества (КК) оборудования и ПЭТ-изображения [6–8]. Понятие качества изображения является комплексным и может быть определено как объективными количественными параметрами качества, так и с помощью визуальной субъективной экспертной оценки. К объективным параметрам качества ПЭТ-изображения относятся измеримые параметры, например, шум, однородность, пространственное разрешение, коэффициент восстановления, отношение сигнал/шум и др. [9, 10].

Таблица 1

Оборудование, параметры реконструкции, протоколов сканирования и проведения исследования

Equipment, reconstruction, acquisition and examination protocols parameters

МО	ПЭТ/КТ-система	Материал детекторов	Параметры реконструкции	Фильтр пост-реконструкции	Время сканирования одной кровати, мин	Средняя вводимая активность, МБк	Активность × время сканирования одной кровати, МБк · мин	Среднее время введения – сканирование, мин
I	Biograph mCT 128	LSO	OSEM 3D 2i21s PSF+ToF	Hamm 5,0	2,3	193±5	445	81±4
	Biograph mCT 40	LSO	OSEM 3D 2i21s PSF+ToF	Hamm 5,0	2,3	211±10	486	74±5
	Discovery 690	LYSO	OSEM 3D 2i24s PSF+ToF	Cutoff 6,4	2,4	207±10	497	105±6
II	Biograph mCT 128	LSO	OSEM 3D 2i21s PSF+ToF	Gauss 2,0	2,5	181±8	453	63±3
III	Biograph mCT 128	LSO	OSEM 3D 2i21s PSF+ToF	Gauss 5,0	1,0	223±7	223	68±3
IV	Biograph mCT 128	LSO	OSEM 3D 4i8s PSF	Hamm 6,0	3,0	214±10	642	84±10
V	Biograph 6	LSO	OSEM 2D 4i8s	Gauss 5,0	3,0	200±9	616	103±14
VI	Discovery 710	LYSO	OSEM 3D 2i24s	Cutoff 6,4	3,0	346±22	1039	76±3
VII	Gemini TF Base	LYSO	LOR-RAMLA	–	1,3	237±21	309	72±3
	Discovery 710	LYSO	OSEM 3D 2i24s PSF+ToF	Cutoff 6,4	2,0	242±8	484	85±16
VIII	Biograph DUO	LSO	OSEM 2D 2i8s	–	4,0	227±12	908	94±9
IX	Discovery 610	BGO	OSEM 3D 2i24s PSF	Cutoff 6,4	1,5	258±8	388	48±1

Примечание: МО – медицинская организация; ± – погрешность среднего; LSO – Lutetium Oxyorthosilicate (ортосиликат лютеция); LYSO – Lutetium Yttrium Orthosilicate (ортосиликат лютеция-иттрия); BGO – Bismuth Germanate (германт висмута); PSF – Point Spread Function (функция точечного распределения); ToF – Time of Flight (время-пролетная функция); OSEM – Ordered Subset Expectation Maximization (алгоритм максимизации ожидания упорядоченных подмножеств); i – iterations (итерации); s – subsets (подмножества)

Однако количественные параметры не в полной мере способны описать качество изображения. В клинической практике интерпретация ПЭТ-изображений также основана на визуальной оценке, и качественное изображение по объективным параметрам визуально может оказаться неудовлетворительным для врачей-экспертов. Кроме того, способы оконтуривания областей интереса при определении количественных показателей также варьируют, что существенно влияет на количественную оценку исследования [11].

Основные процедуры КК в ПЭТ в отечественной практике представлены в методических указаниях «Методы контроля качества в ПЭТ-диагностике для оптимизации радиационной защиты» (МУК 2.6.7.3651-20)¹. Методика КК ПЭТ-изображения основана на оценке объективных количественных параметров изображения специализированного фантома NEMA IEC Body со сферическими вставками различного диаметра, который имитирует тело пациента с очагами накопления РФЛП [8, 12]. Данная методика гармонизирована с методикой, используемой в международной программе аккредитации ПЭТ-отделений [13]. Также в документе предполагается пересмотр или оптимизация протоколов проведения исследований и сканирования пациентов с последующей оценкой информативности изображения, например, в случае выявления высоких уровней облучения пациентов на аппарате (дозы у пациентов выше референсного диагностического уровня). Помимо этого, департаментом здравоохранения города Москвы выпущены методические рекомендации по проведению и описанию исследований методом ПЭТ/КТ², в которых

¹ МУК 2.6.7.3651-20 «Методы контроля качества в ПЭТ-диагностике для оптимизации радиационной защиты». Методические указания. М.: Роспотребнадзор, 2020 [МУК 2.6.7.3651-20 “Quality control methods in PET diagnostics for optimization of radiation protection”. Rosptrebnadzor, 2020 (In Russian)]

² Методические рекомендации №49 «Рекомендации по проведению и описанию исследований методом позитронной эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией, проводимых за счет средств московского городского фонда обязательного медицинского страхования». М.: Департамент здравоохранения Москвы, 2021 [Methodical guidelines No 49 «Guidelines for conducting and description of examinations by positron emission tomography combined with computed tomography». Moscow Department of Health, 2021 (In Russian)]

предложена концепция стандартизации методик проведения исследования и проведения экспертной оценки диагностических исследований с целью получения воспроизводимых и высококачественных результатов диагностики в различных отделениях. Согласно документу, эксперты поэтапно оценивают параметры выполнения исследования; итоговая диагностическая пригодность изображения оценивается по наличию артефактов и качеству изображения. Однако в настоящее время отсутствует методика оценки качества клинических изображений пациентов, которая позволила бы оценить практику выполнения исследования в ПЭТ-отделении.

Целью настоящей работы была разработка методики экспертной оценки качества ПЭТ-изображений как дополнительного инструмента к тестам КК для получения точных, сопоставимых и воспроизводимых результатов исследований, а также оценка изображений на ее основе в разных ПЭТ-отделениях.

Материал и методы

Сбор данных

Диагностические ПЭТ-изображения пациентов были получены ретроспективно на двенадцати ПЭТ/КТ-аппаратах в девяти отечественных отделениях ПЭТ-диагностики. Модели аппаратов, их характеристики и параметры используемых клинических протоколов сбора данных и реконструкции изображения представлены в табл. 1. Модельный ряд аппаратов представлен тремя основными производителями: Biograph – Siemens (Германия), Discovery – General Electric (США) и Gemini – Philips (Нидерланды).

На каждом аппарате были отобраны ПЭТ-изображения пяти пациентов, прошедших ПЭТ/КТ-исследование всего тела с ¹⁸F-ФДГ. Критериями включения изображений в исследование являлось значение массы тела пациента, близкое к стандартному (70±5 кг) [14], и отсутствие патологических очагов в зоне печени. Все полученные изображения были анонимизированы.

Методика проведения экспертной оценки качества

Экспертная оценка качества ПЭТ-изображений была проведена с применением анонимного анкетирования врачей-экспертов, работающих в ПЭТ-отделениях. Для этого была создана анкета с использованием Google

Forms, что сократило время обработки результатов и расширило возможности для проведения оценки качества дистанционно. Анкета состояла из вводной части, где врачи-эксперты отмечали стаж работы в радиологии и место работы, и основной части для регистрации оценок. Врачам-экспертам было предоставлено 60 рандомизированных ПЭТ-изображений (без КТ) для оценки в удобных и привычных условиях работы с возможностью регулирования яркости и контрастности изображения, используя функционал компьютерного обеспечения. Каждый врач-эксперт давал субъективную оценку качества каждого изображения по трем критериям: четкость изображения, а именно возможность распознавания границ и дифференцирования анатомических структур без КТ; артефакты изображения, связанные с оборудованием (артефакты в виде светлых или темных горизонтальных линий, колец, веерообразные артефакты [15]) и подготовкой пациента к исследованию (артефакты в виде зернистости и повышенного накопления в мышцах и жировой ткани, связанные с несоблюдением диеты, физической активностью, а также артефакты, связанные с введением активности и нарушением инструкций о дыхании и движениях во время сканирования [16]); общее качество изображения, то есть диагностическая приемлемость изображения в целом [17, 18]. Пример анкеты представлен на рис. 1.

1

16. 26. 36. 46. 56.

Четкость изображения	<input type="radio"/>				
Артефакты изображения	<input type="radio"/>				
Общее качество изображения	<input type="radio"/>				

Комментарии (обоснование оценки)

Мой ответ

Рис. 1. Анкета для проведения экспертной оценки качества

Fig. 1. Form for experts' quality evaluation

Всего было привлечено 28 врачей-экспертов с различным стажем работы в области радиологии: 6 врачей-экспертов со стажем работы более 15 лет; 13 – от 5 до 15 лет; 9 – менее 5 лет из восьми медицинских организаций (МО): I (МО1), II (МО2), IV(МО3), V, VI (МО4), VII, VIII (МО5) и МО6, в которой не были собраны изображения.

Для оценки была использована пятибалльная шкала. Интерпретация балльной шкалы представлена в табл. 2 и согласуется с интерпретацией, представленной авторами в исследованиях [17, 18]. Помимо этого, каждый врач-эксперт имел возможность оставить комментарий к изображению и/или дать пояснение выставленной оценке. Перед оценкой качества изображений каждому эксперту была предоставлена информация о критериях в соответствии с представленным выше описанием и об интерпретации баллов (табл. 2). Кроме того, были предложены три тестовые серии ПЭТ-изображений, не входящие в общую выборку, с целью ознакомления врачей-экспертов с изображениями,

полученными на разных аппаратах, и анкетой (рис.1), а также обучения методике и сведения к минимуму ошибок при выставлении оценки. Тестовые серии ПЭТ-изображений пациентов (Тест 1–3) представлены на рис. 2. Изображение Тест 1 достаточно четкое (по мнению врачей-экспертов, 4–5 баллов), обладает минимальным количеством артефактов (по мнению врачей-экспертов, 4–5 баллов), общее качество изображения между хорошим и отличным (по мнению врачей-экспертов, 4–5 баллов); Тест 2 – менее четкое, границы структур размыты (по мнению врачей-экспертов, 3–4 балла), минимальное количество артефактов (по мнению врачей-экспертов, 4–5 баллов), общее качество изображения хорошее (4 балла); Тест 3 – недостаточная четкость (по мнению врачей-экспертов, 2–3 балла), явно выраженные артефакты в виде полос на фронтальном срезе (по мнению врачей-экспертов, 2–3 балла), общее качество изображения удовлетворительное и достаточное для диагностики (по мнению врачей-экспертов, 3 балла).

Таблица 2

Интерпретация оценки ПЭТ-изображений
Interpretation of PET image evaluation

	Четкость	Артефакты	Общее качество
5 баллов	Отлично, границы структур четкие	Отлично, нет артефактов	Отличное
4 балла	Хорошо, достаточно четкие границы	Хорошо, минимальное количество артефактов	Хорошее
3 балла	Удовлетворительно, недостаточно четкие границы	Удовлетворительно, диагностически незначимые артефакты	Удовлетворительное, достаточное для диагностики
2 балла	Плохо, границы нечеткие	Плохо, диагностика затруднена из-за артефактов	Плохое, диагностика затруднена
1 балл	Очень плохо, невозможно различить структуры	Очень плохо, большое количество артефактов	Очень плохое, диагностика невозможна

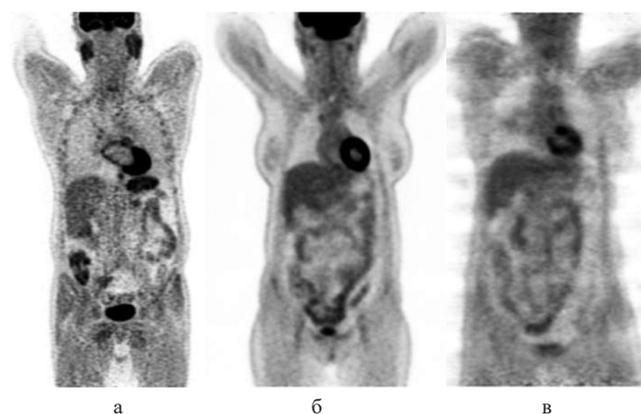


Рис. 2. Тестовые ПЭТ-изображения (фронтальные срезы), предоставленные врачам-экспертам: а – Тест 1; б – Тест 2; в – Тест 3
Fig. 2. PET images for test the quality evaluation which provided to the experts: а – Test 1; б – Test 2; в – Test 3

На выставление оценок для 60 изображений в среднем врачу-эксперту требовалось от 60 до 120 мин. В случае невозможности уделить данное время на выставление оценки в один этап, проведение оценки врачом-экспертом могло быть разбито на несколько этапов.

Обработка данных

Полученные результаты экспертной оценки были обработаны с использованием описательной статистики в программе Microsoft Excel.

Между результатами экспертной оценки и используемыми параметрами протоколов проведения исследования (вводимая активность, время между введением и сканированием) и сканирования (время сканирования одной кровати, произведение активности и времени сканирования одной кровати) были исследованы взаимосвязи с помощью корреляционного анализа с применением коэффициента Спирмена (r_s). Исследование взаимосвязей между критериями качества изображений также было проведено с помощью корреляционного анализа.

Исследование влияния факторов субъективности: стажа и условий (места) работы врача-эксперта на результаты оценки качества изображений было проведено посредством сравнения групп врачей-экспертов соответственно по стажу и месту работы с применением дисперсионного анализа Краскела–Уоллиса и с последующим парным сравнением групп с применением критерия Манна–Уитни. Различия считались статистически значимыми при уровне значимости $p < 0,05$. МО, в которых была получена оценка только от одного врача-эксперта (V, VII), не были включены в сравнение групп врачей-экспертов по месту работы.

Минимально необходимое количество врачей-экспертов для проведения оценки качества изображений было установлено посредством сравнения оценок случайных сокращенных выборок врачей-экспертов ($n=3$, $n=4$, $n=5$, $n=6$, $n=10$) с оценками общей выборки врачей-экспертов с применением критерия Манна–Уитни. Оптимальным считалось то количество врачей-экспертов, при сравнении оценок которых с оценками общей выборки врачей-экспертов не было установлено статистически значимых различий. Для определения возможности проведения оценки качества изображения внутренним составом врачей аналогично было проведено сравнение оценок общей выборки врачей-экспертов с оценками, которые были даны изображениям, полученным в отделении, где работают врачи-эксперты («своим» изображениям).

Статистический анализ данных был проведен в программе Statistica 10.

Результаты и обсуждение

Результаты экспертной оценки качества изображений

Результаты экспертной оценки представлены на рис. 3. Изображения, полученные на восьми аппаратах, имели средний балл 4 и выше по всем критериям. Средний балл ниже 4 был выставлен изображениям, которые были получены на аппаратах: IV Biograph mCT 128, V Biograph 6, VII Gemini TF Base и VIII Biograph DUO. Согласно табл. 1, данные аппараты обладают устаревшими характеристиками (характеристики детектирующей системы, отсутствие режимов время-пролетной функции (ToF) и функции точечного распределения (PSF) [19]) и/или нетипичными параметрами реконструкции.

Взаимосвязи между результатами экспертной оценки и параметрами протоколов

Полученные значения корреляционных коэффициентов (r_s) между критериями качества изображения и параметрами протоколов проведения исследования и сканирования представлены в табл. 3. Корреляционный анализ был проведен для полной выборки аппаратов и для сокращенной выборки, из которой были исключены аппараты с наиболее низкими оценками (менее 4 баллов).

Установленные взаимосвязи между экспертной оценкой и временем между введением активности и скани-

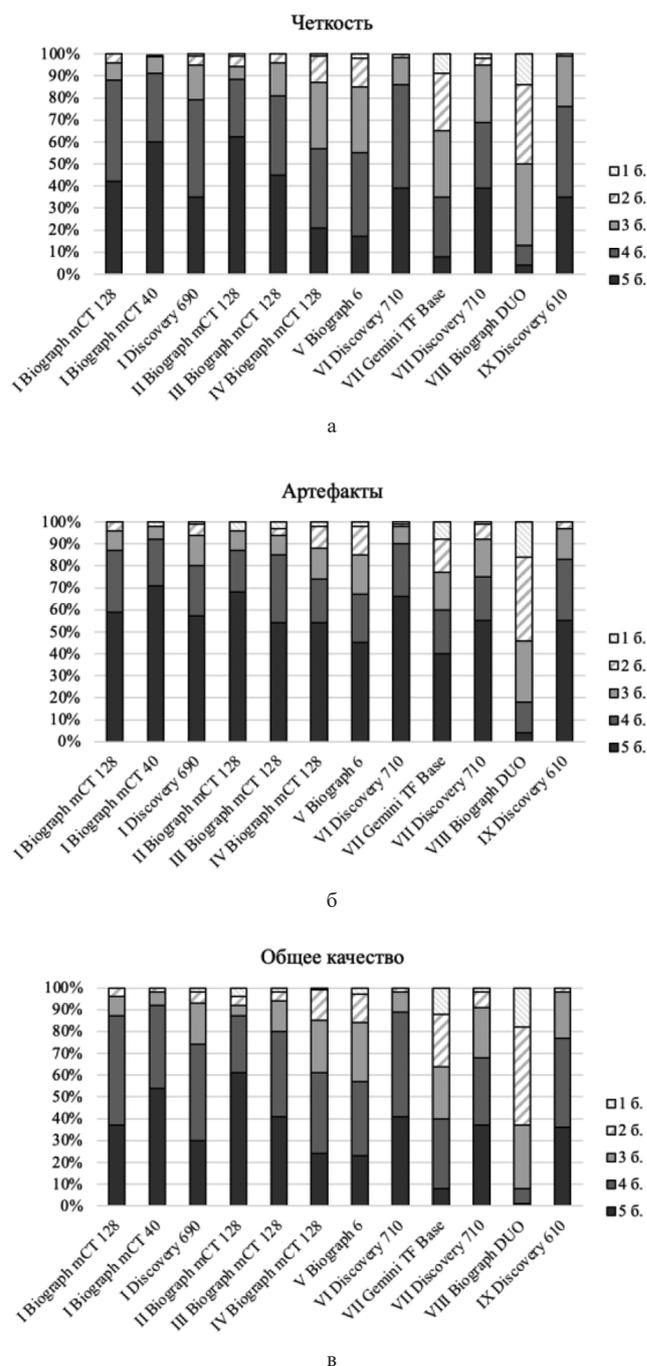


Рис. 3. Процентное распределение оценок для каждого аппарата по критериям: четкость (а), артефакты (б) и общее качество (в)

Fig. 3. Percentage distribution of quality values for each PET/CT scanner by image clarity (a), artefacts (б), general quality (в)

рованием свидетельствуют о снижении качества изображения с ростом времени между введением активности и сканированием. Однако необходимо учитывать, что время между введением активности и сканированием менее 60 мин может приводить к недооценке накопления в очаге и неверной интерпретации результатов исследования [16].

Результаты корреляционного анализа демонстрируют, что увеличение времени сканирования одной кровати приводит к более высоким экспертным оценкам. Время сканирования одной кровати влияет на статистику зарегистрированных сигналов [20] и соответственно в большей мере влияет на зернистость (шум) изображе-

Таблица 3

Корреляции между экспертной оценкой и параметрами протоколов проведения исследования и сканирования (значения коэффициентов Спирмена, r_s)

Correlations between experts' quality evaluation and parameters of examination and acquisition protocols (Spearman's coefficients, r_s)

Параметр	Четкость	Артефакты	Общее качество
Полная выборка аппаратов			
Введенная активность	н	н	н
Время введение-сканирование	-0,49	-0,48	-0,50
Время сканирования одной кровати	н	н	н
Активность × время сканирования одной кровати	н	н	н
Выборка без аппаратов с нетипичными настройками реконструкции и устаревшими характеристиками (8 аппаратов)			
Введенная активность	-0,43	н	-0,30
Время введение-сканирование	-0,40	-0,40	-0,43
Время сканирования одной кровати	0,36	0,49	0,44
Активность × время сканирования одной кровати	н	н	н

Примечание: н – незначимые корреляции ($r_s < 0,3$)

ния, что при оценке наиболее часто отмечали врачи-эксперты в комментариях.

Отсутствие взаимосвязей между экспертной оценкой и произведением активности на время сканирования одной кровати свидетельствует о том, что при определении параметров вводимой активности и времени сканирования одной кровати в ПЭТ-отделениях учтено их совместное влияние на изображение [2].

Взаимосвязи между критериями экспертной оценки

Результаты корреляционного анализа по оценке взаимосвязи между критериями экспертной оценки представлены в табл. 4.

Таблица 4

Корреляции между критериями экспертной оценки (значения коэффициентов Спирмена, r_s)

Correlations between criteria of experts' quality evaluation (Spearman's coefficients, r_s)

	Четкость	Артефакты	Общее качество
Четкость	1	0,63	0,90
Артефакты	0,63	1	0,69
Общее качество	0,90	0,69	1

Установленная сильная корреляция между критериями четкости и общего качества изображения свидетельствует о том, что четкость изображения является наиболее важным критерием при оценке качества, который влияет на общее экспертное мнение о качестве изображения. Четкость изображения определяет возможность распознавания очагов накопления РФЛП у пациентов. При этом установленные умеренные корреляции между критериями четкости изображения и артефактов подтверждают мнение некоторых врачей-экспертов, что артефакты изображения, связанные с высоким шумом (зернистостью), влияют на четкость изображения.

Взаимосвязи между результатами экспертной оценки и факторами субъективности

Сравнение групп по стажу работы (менее 5 лет, от 5 до 15 лет и более 15 лет) и по месту работы представлено на рис. 4.

По критерию четкости изображения при сравнении между группами врачей-экспертов по стажу работы не было установлено статистически значимых различий.

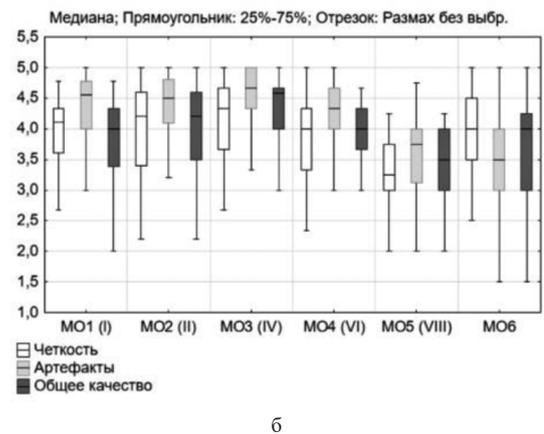
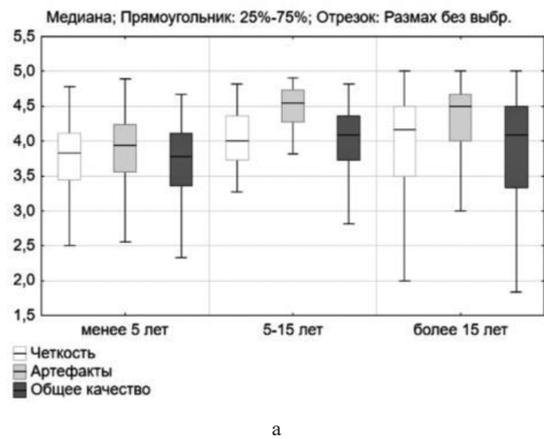


Рис. 4. Сравнение оценок между группами врачей-экспертов по стажу работы (а) и месту работы (б)

Fig. 4. Comparison between groups of experts by work experience (a) and by work conditions (b)

По критериям артефактов и общего качества изображения были установлены статистически значимые различия; оценки экспертов со стажем работы менее 5 лет были достоверно ниже по сравнению с оценками экспертов, которые работают более 5 лет.

При сравнении между группами врачей-экспертов по месту работы статистически значимые различия были установлены по всем критериям. Оценки экспертов из группы МО3 были достоверно выше по всем критериям; из групп МО5 и МО6 достоверно ниже по всем критериям и по критерию артефактов соответственно.

Полученные результаты продемонстрировали, что экспертная оценка качества зависит как от стажа, так и от условий (места) работы эксперта. Поэтому при проведении экспертной оценки качества необходимо привлекать врачей-экспертов с различным опытом работы.

Минимально необходимое количество врачей-экспертов для проведения оценки качества

При сравнении оценок общей выборки врачей-экспертов с выборками из трех, четырех и пяти врачей-экспертов были установлены статистически значимые различия в рамках использования четырех аппаратов. При сравнении с выборкой из шести врачей-экспертов статистически значимых различий не было установлено; с выборкой из десяти врачей-экспертов статистических значимых различий также не было установлено. Таким образом, при проведении экспертной оценки качества изображений минимально должно быть задействовано шесть врачей-экспертов.

Между оценками полной выборки врачей-экспертов и оценками, которые были даны изображениям, полу-

ченным в отделении, где работают врачи-эксперты (то есть «своим» изображениям), были установлены статистически значимые различия для двух из семи аппаратов. Было выявлено, что на аппаратах I Discovery 690 и VIII Biograph DUO врачи-эксперты оценивали «свои» изображения достоверно выше по сравнению с оценкой полной выборки врачей. Этот результат демонстрирует возможность завышения оценки врачами-экспертами визуально привычных изображений.

Заключение

Разработана методика экспертной оценки качества клинических ПЭТ-изображений пациентов, основанная на анкетировании врачей, работающих в ПЭТ, с использованием балльной оценки качества изображений по трем критериям: четкость изображения, наличие артефактов и общее качество изображения. Экспертная оценка качества изображений имеет потенциал для сопоставления ПЭТ-изображений, полученных на разных протоколах сканирования и реконструкции, а также в разных ПЭТ-отделениях, и выявления нетипичных и устаревших настроек аппаратов для качественной диагностики. Эту методику можно применять при оптимизации протоколов проведения исследования для оценки

качества получаемого изображения и в комбинации с фантомными методами для получения сопоставимых результатов диагностики в разных отделениях. Полученные результаты показали, что для экспертной оценки качества изображений и гармонизации практик работы различных ПЭТ-отделений должно привлекаться не менее шести квалифицированных врачей-экспертов с различным опытом работы из нескольких отделений. При выявлении неудовлетворительных результатов оценки предполагается исследование причин, при необходимости пересмотр или оптимизация протоколов проведения исследований, сканирования и реконструкции с последующей оценкой изображений.

По результатам экспертной оценки качества изображений на всех ПЭТ/КТ-аппаратах отсутствовали изображения, не пригодные для диагностики; хорошее качество изображений было определено для 66 % аппаратов; удовлетворительное – для 25 % аппаратов.

Благодарности

Авторы выражают огромную благодарность сотрудникам ПЭТ-отделений за предоставленные изображения, а также всем врачам-экспертам, которые приняли участие в настоящем исследовании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Водоватов А.В., Башкетова Н.С., Историк О.А. и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Ч.1. Тенденции развития, структура лучевой диагностики и дозы медицинского облучения // Радиационная гигиена. 2019. Т.12, № 1. С. 6-24. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24.
2. Boellaard R., Delgado-Bolton R., Oyen W.J., Giammarile F., Tatsch K., Eschner W., et al. FDG PET/CT: EANM Procedure Guidelines for Tumour Imaging: Version 2.0 // Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging. 2015. V.42, No. 2. P. 328-354. DOI: 10.1007/s00259-014-2961-x.
3. Mansor S., Pfahler E., Heijtel D., Lodge M.A., Boellaard R., Yaqub M. Impact of PET/CT System, Reconstruction Protocol, Data Analysis Method, and Repositioning on PET/CT Precision: An Experimental Evaluation Using an Oncology and Brain Phantom // Med. Phys. 2017. V.44, No. 12. P. 6413-6424. DOI: 10.1002/mp.12623.
4. Чипига Л.А., Звонова И.А., Рыжкова Д.В., Меньков М.А., Долгушин М.Б. Уровни облучения пациентов и возможные пути оптимизации ПЭТ-диагностики в России // Радиационная гигиена. 2017. Т.10, № 4. С. 31-43. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43.
5. Hristova I., Boellaard R., Galette P., Shankar L.K., Liu Y., Stroobants S., et al. Guidelines for Quality Control of PET/CT Scans in a Multicenter Clinical Study // EJNMMI Phys. 2017. V.4, No. 1. P. 23. DOI: 10.1186/s40658-017-0190-7.
6. De Jong E.E.C., van Elmpt W., Hoekstra O.S., Groen H.J.M., Smit E.F., Boellaard R., et al. Quality Assessment of Positron Emission Tomography Scans: Recommendations for Future Multicentre Trials // Acta Oncol. 2017. V.56, No. 11. P. 1459-1464. DOI: 10.1080/0284186X.2017.1346824.
7. Schaefferkoetter J.D., Osman M., Townsend D.W. The Importance of Quality Control for Clinical PET Imaging // J. Nucl. Med. Technol. 2017. V.45, No. 4. P. 265-266. DOI: 10.2967/jnmt.117.198465.
8. Чипига Л.А., Водоватов А.В., Катаева Г.В., Рыжкова Д.В., Долгушин М.Б., Меньков М.А. и др. Современные подходы к обеспечению качества диагностики в позитронно-эмиссионной томографии // Медицинская физика. 2019. Т.82, № 2. С. 78-92.
9. Иноземцев К.О., Наркевич Б.Я., Меньков М.А., Долгушин М.Б. Разработка программы гарантии качества для комбинированного ПЭТ/КТ-сканера // Медицинская физика. 2013. Т.57, № 1. С. 65-77.
10. Климанов В.А. Ядерная медицина. Радионуклидная диагностика: Учебное пособие для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2018. 307 с.
11. Виноградова Ю.Н., Глостанова М.С., Иванова А.А., Пахомов А.Ю., Ильин Н.В. Методические аспекты измерения метаболического объема опухоли у больших диффузной В-клеточной крупноклеточной лимфомой при ПЭТ/КТ с 18F-ФДГ // Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2021. Т.4, № 4. С. 28-39. DOI: 10.37174/2587-7593-2021-4-4-28-39.
12. NEMA Standards Publication NU 2-2018: Performance Measurements of Positron Emission Tomographs (PETS). National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Washington, 2018.
13. Kaalep A., Sera T., Oyen W., Krause B.J., Chiti A., Liu Y., et al. EANM/EARL FDG-PET/CT Accreditation - Summary Results from the First 200 Accredited Imaging Systems // Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging. 2018. V.45, No. 3. P. 412-422. DOI: 10.1007/s00259-017-3853-7.
14. Водоватов А.В., Камышанская И.Г., Дроздов А.А. Новый подход к определению стандартного пациента для оптимизации защиты пациентов от медицинского облучения // Радиационная гигиена. 2014. Т.7, № 4. С. 104-116.
15. International Atomic Energy Agency. PET/CT Atlas on Quality Control and Image Artefacts. IAEA Human Health Series No. 27. Vienna: IAEA, 2014.
16. International Atomic Energy Agency. Standard Operating Procedures for PET/CT: a Practical Approach for Use in Adult Oncology. IAEA Human Health Series No. 26, Vienna: IAEA, 2013.
17. Messerli M., Stolzmann P., Egger-Sigg M., Trinckauf J., D'Aguzzo S., Burger I.A., et al. Impact of a Bayesian Penalized Likelihood Reconstruction Algorithm on Image Quality in Novel Digital PET/CT: Clinical Implications for the Assessment of Lung Tumors // EJNMMI Phys. 2018. V.5, No. 1. P. 27. DOI: 10.1186/s40658-018-0223-x.
18. Sah B.R., Stolzmann P., Delso G., Wollenweber S.D., Hüllner M., Hakami Y.A., Queiroz M.A., et al. Clinical Evaluation of a Block Sequential Regularized Expectation Maximization Reconstruction Algorithm in 18F-FDG PET/CT Studies // Nucl. Med. Commun. 2017. V.38, No. 1. P. 57-66. DOI: 10.1097/MNM.0000000000000604.

19. Akamatsu G., Ishikawa K., Mitsumoto K., Taniguchi T., Ohya N., Baba S., et al. Improvement in PET/CT Image Quality with a Combination of Point-Spread Function and Time-of-Flight in Relation to Reconstruction Parameters // *J. Nucl. Med.* 2012. V.53, No. 11. P. 1716-1722. DOI: 10.2967/jnumed.112.103861.
20. Van Sluis J., Boellaard R., Dierckx R.A.J.O., Stormezand G.N., Glaudemans A.W.J.M., Noordzij W. Image Quality and Activity Optimization in Oncologic 18F-FDG PET Using the Digital Biograph Vision PET/CT System // *J. Nucl. Med.* 2020. V.61, No. 5. P. 764-771. DOI: 10.2967/jnumed.119.234351.

REFERENCES

- Onishchenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Vodovatov A.V., Bashketova N.S., Istorik O.A., et al. Modern Principles of the Radiation Protection from Sources of Ionizing Radiation in Medicine. Part 1. Trends, Structure of x-Ray Diagnostics and Doses from Medical Exposure. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene.* 2019;12;1:6-24. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24 (In Russ.).
- Boellaard R., Delgado-Bolton R., Oyen W.J., Giammarile F., Tatsch K., Eschner W., et al. FDG PET/CT: EANM Procedure Guidelines for Tumour Imaging: Version 2.0. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* 2015;42;2:328-354. DOI: 10.1007/s00259-014-2961-x.
- Mansor S., Pfaehler E., Heijtel D., Lodge M.A., Boellaard R., Yaqub M. Impact of PET/CT System, Reconstruction Protocol, Data Analysis Method, and Repositioning on PET/CT Precision: An Experimental Evaluation Using an Oncology and Brain Phantom. *Med. Phys.* 2017;44;12:6413-6424. DOI: 10.1002/mp.12623.
- Chipiga L.A., Zvonova I.A., Ryzhkova D.V., Menkov M.A., Dolgushin M.B. Levels of Patients Exposure and a Potential for Optimization of The PET Diagnostics in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene.* 2017;10;4:31-43. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43 (In Russ.).
- Hristova I., Boellaard R., Galette P., Shankar L.K., Liu Y., Stroobants S., et al. Guidelines for Quality Control of PET/CT Scans in a Multicenter Clinical Study. *EJNMMI Phys.* 2017;4;1:23. DOI: 10.1186/s40658-017-0190-7.
- De Jong E.E.C., van Elmpt W., Hoekstra O.S., Groen H.J.M., Smit E.F., Boellaard R., et al. Quality Assessment of Positron Emission Tomography Scans: Recommendations for Future Multicentre Trials. *Acta Oncol.* 2017;56;11:1459-1464. DOI: 10.1080/0284186X.2017.1346824.
- Schaefferkoetter J.D., Osman M., Townsend D.W. The Importance of Quality Control for Clinical PET Imaging. *J. Nucl. Med. Technol.* 2017;45;4:265-266. DOI: 10.2967/jnmt.117.198465.
- Chipiga L.A., Vodovatov A.V., Katayeva G.V., Ryzhkova D.V., Dolgushin M.B., Menkov M.A., et al. Proposals of Quality Assurance in Positron Emission Tomography in Russia. *Meditsinskaya Fizika = Medical Physics.* 2019;82;2:78-92 (In Russ.).
- Inozemtsev K.O., Narkevich B.Ya., Menkov M.A., Dolgushin M.B. The Development of Quality Assurance Program for Combined PET/CT-scanner. *Meditsinskaya Fizika = Medical Physics.* 2013;57;1:65-77 (In Russ.).
- Klimanov V.A. *Yadernaya Meditsina. Radionuklidnaya Diagnostika = Nuclear Medicine. Radionuclide Diagnostics.* Textbook. Moscow, Yurayt Publ., 2018. 307 p. (In Russ.).
- Vinogradova Yu.N., Tlostanova M.S., Ivanova A.A., Pakhomov A.Yu., Ilin N.V. Methodological Aspects of Measuring Metabolic Tumor Volume in Patients with Diffuse B-Cell Large Cell Lymphoma by PET/CT with 18F-FDG. *Onkologicheskij Zhurnal: Luchevaya Diagnostika, Luchevaya Terapiya = Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy.* 2021;4;4:28-39. DOI: 10.37174/2587 7593 2021 4 4 28-39 (In Russ.).
- NEMA Standards Publication NU 2-2018: Performance Measurements of Positron Emission Tomographs (PETS). National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Washington, 2018.
- Kaalep A., Sera T., Oyen W., Krause B.J., Chiti A., Liu Y., et al. EANM/EARL FDG-PET/CT Accreditation - Summary Results from the First 200 Accredited Imaging Systems. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* 2018;45;3:412-422. DOI: 10.1007/s00259-017-3853-7.
- Vodovatov A.V., Kamyshanskaya I.G., Drozdov A.A. New Approach for The Determination of The Standard Patient to Be Used for The Optimization of The Medical Exposure Protection. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene.* 2014;7;4:104-116 (In Russ.).
- International Atomic Energy Agency. PET/CT Atlas on Quality Control and Image Artefacts. IAEA Human Health Series No. 27. Vienna: IAEA, 2014.
- International Atomic Energy Agency. Standard Operating Procedures for PET/CT: a Practical Approach for Use in Adult Oncology. IAEA Human Health Series No. 26, Vienna: IAEA, 2013.
- Messerli M., Stolzmann P., Egger-Sigg M., Trinckauf J., D'Aguzzo S., Burger I.A., et al. Impact of a Bayesian Penalized Likelihood Reconstruction Algorithm on Image Quality in Novel Digital PET/CT: Clinical Implications for the Assessment of Lung Tumors. *EJNMMI Phys.* 2018;5;1:27. DOI: 10.1186/s40658-018-0223-x.
- Sah B.R., Stolzmann P., Delso G., Wollenweber S.D., Hülner M., Hakami Y.A., Queiroz M.A., et al. Clinical Evaluation of a Block Sequential Regularized Expectation Maximization Reconstruction Algorithm in 18F-FDG PET/CT Studies. *Nucl. Med. Commun.* 2017;38;1:57-66. DOI: 10.1097/MNM.0000000000000604.
- Akamatsu G., Ishikawa K., Mitsumoto K., Taniguchi T., Ohya N., Baba S., et al. Improvement in PET/CT Image Quality with a Combination of Point-Spread Function and Time-of-Flight in Relation to Reconstruction Parameters. *J. Nucl. Med.* 2012;53;11:1716-1722. DOI: 10.2967/jnumed.112.103861.
- Van Sluis J., Boellaard R., Dierckx R.A.J.O., Stormezand G.N., Glaudemans A.W.J.M., Noordzij W. Image Quality and Activity Optimization in Oncologic 18F-FDG PET Using the Digital Biograph Vision PET/CT System. *J. Nucl. Med.* 2020;61;5:764-771. DOI: 10.2967/jnumed.119.234351.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.09.2022. **Принята к публикации:** 25.11.2022.

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: 20.09.2022. **Accepted for publication:** 25.11.2022.