ISSN 1814-6023 (Print)
ISSN 2524-2350 (Online)
УДК 612.428+616.411-006.441]-073.756.8
https://doi.org/10.29235/1814-6023-2022-19-1-70-83

Поступила в редакцию 02.06.2021
Received 02.06.2021

С. А. Хоружик, А. В. Карман, Э. А. Жаврид

Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова, Минск, Республика Беларусь

МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНО-ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ ИЗМЕРЯЕМЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ДИФФУЗИИ ПРИ ЛИМФОМАХ И ЕГО ЗАВИСИМОСТЬ ОТ РЯДА ТЕХНИЧЕСКИХ И КЛИНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Аннотация. Цель исследования – определить значение измеряемого коэффициента диффузии (ИКД) при различных морфологических вариантах лимфом и изучить его зависимость от анатомической локализации поражений и технических параметров сканирования для установления полезности ИКД при дифференциации нормальных и пораженных лимфатических узлов (ЛУ).

Магнитно-резонансная томография с диффузионно-взвешенным исследованием (ДВИ) всего тела была выполнена 209 пациентам с лимфомой до начала лечения. Для определения значения ИКД у каждого пациента выбирали целевой ЛУ.

Установлено, что ИКД не зависит от использования методики параллельной визуализации ($p = 0{,}56$). Его значение при использовании встроенной катушки выше, чем при использовании поверхностной ($p < 0{,}0001$), а при применении респираторного триггеринга выше, чем при свободном дыхании ($p < 0{,}02$). Наиболее высокое значение ИКД ($\times 10^{-3}$ мм^2/с) получено в пораженных ЛУ корней легких (1,429 ± 0,396) и средостения (1,338 ± 0,313), более низкое ($p < 0{,}01$) – в ЛУ брюшной полости (1,011 ± 0,298), подмышечных (0,840 ± 0,196), шеи (0,834 ± 0,259), паховых (0,753 ± 0,128), подвздошных (0,738 ± 0,129). В зависимости от морфологического варианта лимфомы наиболее высокое значение ИКД получено при лимфоме Ходжкина – 1,168 ± 0,372 ($p < 0{,}0002$). При диффузной В-крупноклеточной неходжкинской лимфоме ИКД составил 0,951 ± 0,320, при индолентных неходжкинских лимфомах – 0,756 ± 0,246, при неходжкинской лимфоме из клеток мантийной зоны – 0,759 ± 0,211.

ДВИ-сканирование при лимфоме целесообразно проводить с использованием поверхностной катушки, методики параллельной визуализации и при свободном дыхании. Установлены статистически значимые отличия ИКД в зависимости от анатомической локализации поражений и морфологического варианта лимфомы. Учитывая зависимость ИКД от различных технических и клинических факторов, установить единое пороговое значение для дифференциации пораженных и нормальных ЛУ не представляется возможным. Использование для этой цели такого критерия, как размер ЛУ, является при лимфоме наиболее оптимальным.

Ключевые слова: лимфома Ходжкина, неходжкинская лимфома, магнитно-резонансная томография, диффузионно-взвешенное исследование, измеряемый коэффициент диффузии, лимфатические узлы

Для цитирования: Хоружик, С. А. Магнитно-резонансно-томографический измеряемый коэффициент диффузии при лимфомах и его зависимость от ряда технических и клинических факторов / С. А. Хоружик, А. В. Карман, Э. А. Жаврид // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. мед. навук. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 70–83. https://doi.org/10.29235/1814-6023-2022-19-1-70-83

Siarhei A. Kharuzhyk, Andrey V. Karman, Edward A. Zhavrid

N. N. Alexandrov National Cancer Center of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

MAGNETIC RESONANCE IMAGING APPARENT DIFFUSION COEFFICIENT IN LYMPHOMAS AND ITS DEPENDENCE ON A NUMBER OF TECHNICAL AND CLINICAL FACTORS

Abstract. The purpose of this study was to determine the value of apparent diffusion coefficient (ADC) in various morphological variants of lymphomas, to study dependence of ADC on the anatomical location of lesions and technical scanning parameters to establish the usefulness in differentiating normal and involved lymph nodes (LN).

Whole body MRI with diffusion-weighted imaging (DWI) was performed in 209 patients with lymphoma before treatment. A target LN was selected and ADC determined in each patient.

The ADC value does not depend on the use of the parallel imaging technique ($p = 0.56$), higher when using built-in compared to superficial coil ($p < 0.0001$), higher when using respiratory triggering than free breathing ($p < 0.02$). The highest ADC values ($\times 10^{-3}$ mm^2/s) were obtained in the involved LN of the lung hilar (1.429 ± 0.396) and mediastinum (1.338 ± 0.313), lower

© Хоружик С. А., Карман А. В., Жаврид Э. А., 2022

values ($p < 0.01$) – in the LN of the abdomen (1.011 ± 0.298), axillary (0.840 ± 0.196), neck (0.834 ± 0.259), inguinal (0.753 ± 0.128) and iliac (0.738 ± 0.129). Depending on the morphological variant of lymphoma, the highest ADC value was obtained in Hodgkin lymphoma – 1.168 ± 0.372 ($p < 0.0002$). ADC in diffuse large B-cell non-Hodgkin lymphoma was 0.951 ± 0.320, indolent non-Hodgkin lymphomas – 0.756 ± 0.246, mantle zone non-Hodgkin lymphoma – 0.759 ± 0.211.

In conclusion, DWI in lymphoma should be performed using surface coil, parallel imaging, and free breathing. Statistically significant differences in ADC were found depending on the anatomical location of the lesions and the morphological variant of lymphoma. Given the dependence of ADC on various technical and clinical factors, it is not possible to establish a single threshold value for differentiating involved and normal LN. The use of the LN size criterion for this purpose is the most optimal in lymphoma.

Keywords: Hodgkin lymphoma, non-Hodgkin lymphoma, magnetic resonance imaging, diffusion-weighted imaging, apparent diffusion coefficient, lymph nodes

For citation: Kharuzhyk S. A., Karman A. V., Zhavrid E. A. Magnetic resonance imaging apparent diffusion coefficient in lymphomas and its dependence on a number of technical and clinical factors. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya meditsinskikh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Medical series*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 70–83 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1814-6023-2022-19-1-70-83

Введение. Магнитно-резонансная томография с диффузионно-взвешенным исследованием (МРТ-ДВИ) всего тела – безопасный и эффективный метод лучевой диагностики, который находит применение в различных областях медицины – от ревматологии до онкологии. В 2004 г. МРТ-ДВИ всего тела пациенту с лимфомой впервые выполнил T. Takahara [1]. С того времени метод претерпел значительные технические усовершенствования, что позволяет провести сканирование всего тела менее чем за час. Основными преимуществами МРТ-ДВИ перед другими методами медицинской визуализации являются высокая контрастная разрешающая способность, отсутствие ионизирующего излучения, необходимости внутривенного введения контрастных веществ и радиоактивных изотопов. Не требуется специальной подготовки пациента, кроме обычных мер безопасности при выполнении любого МРТ-исследования. Преимуществом ДВИ перед другими импульсными последовательностями является количественная оценка с помощью измеряемого коэффициента диффузии (ИКД).

При лимфомах МРТ-ДВИ всего тела используют для стадирования, прогнозирования и оценки эффективности лечения [2–6]. Значение ИКД поражений при лимфоме ниже, чем в нормальных лимфоузлах (ЛУ) [7], при доброкачественной лимфаденопатии [8], саркоидозе [9, 10], плоскоклеточном раке [11]. Низкие значения ИКД при лимфомах объясняют более высокой клеточностью, чем в нормальных тканях, доброкачественных и многих злокачественных опухолях. Вместе с тем лимфомы являются неоднородной группой злокачественных опухолей, включающей лимфому Ходжкина (ЛХ) и неходжкинские лимфомы (НХЛ), а среди НХЛ выделяют более 40 морфологических вариантов, которые разделяют на агрессивные и индолентные. К наиболее частым агрессивным НХЛ относят диффузную В-крупноклеточную лимфому (ДВКЛ), фолликулярную G3, некоторые Т-клеточные, к индолентным – фолликулярную G1-2, мелкоклеточную лимфоцитарную, маргинальной зоны, лимфоплазмоцитарную, грибовидный микоз. Лимфому из клеток мантийной зоны относят к агрессивным НХЛ, но у части пациентов она имеет индолентное течение.

В литературе имеются немногочисленные публикации, в которых на сравнительно небольших группах пациентов были определены значения ИКД при различных морфологических вариантах лимфом. Некоторые авторы указывают на отсутствие отличий между значениями ИКД при ЛХ и НХЛ [9], агрессивных и индолентных НХЛ [7], другими авторами получены противоположные результаты [12]. Эти расхождения могут быть связаны с влиянием на значения ИКД ряда клинических и технических факторов, что изучено недостаточно [13–15].

Во многих работах исследована диагностическая эффективность МРТ-ДВИ всего тела по сравнению с позитронной эмиссионной томографией, комбинированной с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ) [3, 6, 14]. При интерпретации ПЭТ/КТ для дифференциации нормальных тканей и опухолевых очагов используют количественный показатель уровня метаболизма глюкозы – стандартизованный показатель накопления. В этой связи актуальным является вопрос, может ли ИКД быть использован для этой же цели у пациентов с лимфомой. Однако для того, чтобы решить этот вопрос, желательно найти единое пороговое значение ИКД.

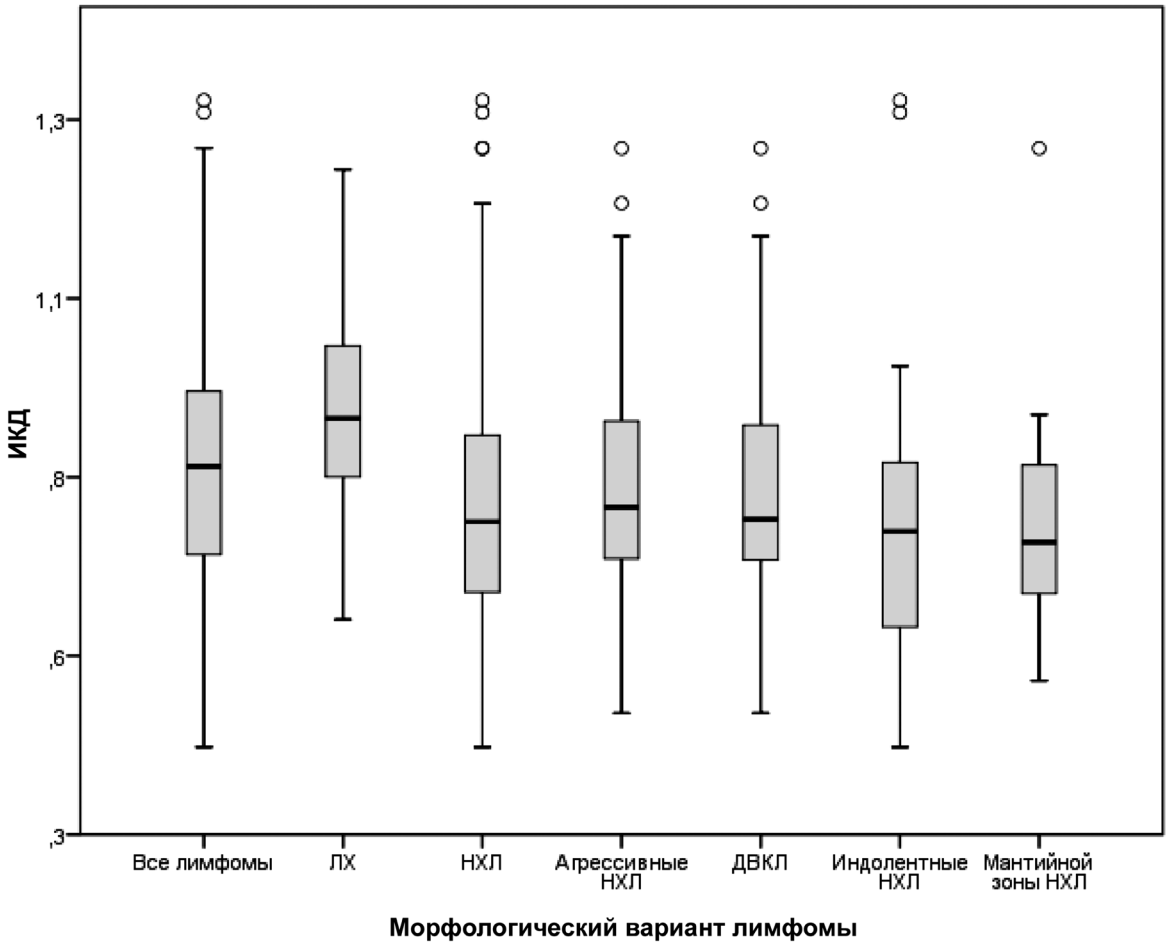

Рис. 3. Ящичные диаграммы значений ИКД (×10^{-3} мм^2/с) пораженных ЛУ, кроме ЛУ средостения и корней легких, в зависимости от морфологического варианта лимфомы у пациентов (n = 135)

Fig. 3. Box plots of the ADC values (×10^{-3}mm^2/s) of the involved LNs, except for the LN of the mediastinum and lung hilar depending on the morphological variant of lymphoma in patients (n = 135)

Таблица 5. **Сравнение ИКД (×10^{-3} мм^2/с) и клеточности пораженных ЛУ в зависимости от анатомической локализации и морфологического варианта лимфомы**

Table 5. **Comparison of ADC (×10^{-3} mm^2/s) and cellularity of the involved LNs depending on the anatomical location and morphological variant of lymphoma**

Пациенты			Сравнение ИКД		Сравнение клеточности	
Вид лимфомы	Группа ЛУ	К-во	ИКД	p	Клеточность	p
ЛХ	Средостения и корней легких	15	1,310 ± 0,350	< 0,0004	2241 ± 796	< 0,021
	Кроме средостения и корней легких	24	0,946 ± 0,227		2822 ± 663	
ЛХ	Кроме средостения и корней легких	24	0,946 ± 0,227	0,0000	2822 ± 663	>0,2
НХЛ		29	0,749 ± 0,164		3061 ± 736	
ЛХ	Кроме средостения и корней легких	24	0,946 ± 0,227	< 0,0001	2822 ± 663	>0,15
ДВКЛ		14	0,817 ± 0,193		2521 ± 474	
ЛХ	Кроме средостения и корней легких	24	0,946 ± 0,227	0,0000	2822 ± 663	< 0,0001
Индолентные и мантийной зоны НХЛ		13	0,656 ± 0,069		3703 ± 431	
ДВКЛ	Кроме средостения и корней легких	14	0,817 ± 0,193	< 0,007	2521 ± 474	0,0000
Индолентные и мантийной зоны НХЛ		13	0,656 ± 0,069		3703 ± 431	

ИКД зависит от тканевой структуры, в частности от размера и плотности расположения клеток, поскольку диффузия происходит в основном в межклеточных пространствах. Ранее нами показана высокая внутри- и межоператорская воспроизводимость ИКД при лимфоме [19]. Однако влияние оператора – это лишь один из возможных источников вариабельности ИКД. Международная группа исследователей выделила следующие группы факторов, оказывающих влияние на значения ИКД: 1) биологические (пациент: размер, форма, степень сотрудничества; поражение: расположение, неоднородность, фенотип, посттерапевтические изменения); 2) оператор сканера (построение протокола сканирования, укладка пациента, уровень квалификации); 3) МРТ-сканер (аппаратная/программная платформа, импульсная последовательность ДВИ и ее технические параметры, характеристики сканера); 4) алгоритм построения карт ИКД; 5) врач (способ нанесения контура для измерения ИКД) [20]. В данной работе исследована зависимость ИКД от ряда технических параметров ДВИ-сканирования и клинических факторов.

Методика параллельной визуализации улучшает временное, пространственное разрешение, уменьшает артефакты (в частности, геометрические искажения), что особенно важно для эхопланарных импульсных последовательностей, к которым относится ДВИ, но при этом снижается соотношение сигнал/шум [21]. В нашем исследовании использование методики параллельной визуализации ASSET не оказало влияния на значение ИКД пораженных ЛУ при лимфоме по сравнению со сканированием без ASSET ($p = 0{,}56$). Аналогично, в исследовании G. Jin с соавт. [22] использование ASSET не повлияло на значение ИКД нормальных и опухолевых тканей молочной железы.

Параллельная визуализация возможна только при использовании многоканальной катушки и невозможна при использовании встроенной. В многоканальной катушке каждый канал усиливает не только сигнал, но и шум, увеличивая их пропорционально количеству каналов (в нашем случае их 8). Учитывая, что на ДВИ-изображениях с высоким фактором диффузии b соотношение сигнал/шум ниже, чем на ДВИ-изображениях с низким b, шум на ДВИ-изображениях с высоким b возрастает в большей степени и, добавляясь к сигналу, снижает ИКД. Этим можно объяснить полученные в нашем исследовании более низкие значения ИКД пораженных ЛУ при использовании поверхностной катушки, чем при использовании встроенной ($p < 0{,}0001$).

По полученным данным, ИКД пораженных ЛУ средостения и корней легких (подвержены влиянию дыхания) при использовании респираторного триггеринга выше, чем при свободном дыхании ($p < 0{,}02$). Других публикаций, в которых было бы изучено влияние способа контроля дыхания на ИКД ЛУ грудной полости при лимфомах, нами не найдено. В работе C. Mesmann с соавт. у пациентов с медиастинальной лимфаденопатией на ДВИ-изображениях оценены качество подавления сигнала от жировой ткани, двигательные артефакты, соотношение сигнал/фон при сканировании с использованием респираторного триггеринга и свободном дыхании. По всем показателям статистически значимых отличий не получено. При этом длительность сканирования ДВИ с респираторным триггерингом в среднем в 2,8 раза больше, чем при свободном дыхании. Авторы делают вывод, что респираторный триггеринг не улучшает качество ДВИ-изображений при медиастинальной лимфаденопатии [23]. Таким образом, использование респираторного триггеринга при ДВИ грудной клетки приводит к увеличению ИКД пораженных ЛУ и длительности сканирования, при этом качество изображений не улучшается. Поэтому при МРТ-ДВИ всего тела у пациентов с лимфомой ДВИ грудной клетки целесообразно сканировать таким же способом, как остальные отделы тела, – при свободном дыхании.

Во второй части нашего исследования изучена зависимость ИКД от клинических факторов – анатомической локализации пораженных ЛУ и морфологического варианта лимфомы. Влияние обоих факторов на ИКД при лимфоме изучено в литературе недостаточно. Важным результатом исследования является доказательство того, что пораженные ЛУ средостения и корней легких при лимфоме имеют более высокое значение ИКД, чем ЛУ всех остальных анатомических групп ($p < 0{,}01$). ЛУ брюшной полости также показали более высокое значение ИКД, чем в остальных анатомических группах ($p < 0{,}004$), кроме ЛУ средостения и корней легких. K. de Paepe с соавт. [13] обследовали пациентов с НХЛ и пришли к аналогичному выводу – ИКД пораженных ЛУ средостения и брюшной полости выше, чем ИКД ЛУ других анатомических областей, что авторы объясняют эффектом частичного объема и двигательными артефактами, связанными

с дыханием и перистальтикой кишечника. D. Albano с соавт. [14] также установили, что при ЛХ ИКД пораженных ЛУ средостения статистически значимо выше, чем в других анатомических областях. По мнению авторов, ИКД ЛУ средостения может быть завышенным под влиянием сердечной пульсации и дыхания. Других публикаций, где бы сравнивались ИКД ЛУ разных анатомических групп при лимфоме, нами не найдено. В нашем предыдущем исследовании ЛУ средостения визуализировались при ДВИ только у 28 % здоровых лиц, ЛУ корней легких – у 20 %, ЛУ брюшной полости – у всех участников исследования [15]. В то же время при КТ нормальные ЛУ средостения определяются у 77 % здоровых [24]. Следовательно, при ДВИ визуализация нормальных ЛУ средостения и корней легких артефактно снижается. Другие авторы подтверждают, что сердечная пульсация снижает визуализацию на ДВИ-изображениях поражений ЛУ средостения, корней легких, верхних отделов левой доли печени. Значения ИКД при этом могут быть искажены [18]. Кроме влияния сердечной пульсации и дыхания, причиной более высокого ИКД ЛУ средостения и корней легких могут быть отличия в их тканевой структуре. По полученным нами данным, пораженные ЛУ этих групп имеют более низкую клеточность в гистологическом материале по сравнению с ЛУ других локализаций ($p < 0{,}021$). Таким образом, визуализация нормальных и пораженных при лимфоме ЛУ средостения и корней легких на ДВИ-изображениях снижается, ИКД в них может быть артефактно завышен, вероятной причиной чего является сердечная пульсация.

В ряде публикаций на относительно небольших группах пациентов проведено сравнение ИКД при различных морфологических вариантах лимфом. S. Gümüştaş с соавт. [9] не выявили отличий между значениями ИКД при ЛХ и НХЛ у 15 пациентов. Аналогичные результаты получены в другом исследовании, включившем 5 пациентов с ЛХ и 6 с НХЛ [8]. В указанных работах исследовали только ЛУ средостения и корней легких. M. Sun с соавт. [25] выполнили МРТ-ДВИ всего тела и сообщают, что ИКД поражений при ЛХ (7 пациентов) статистически значимо выше, чем при агрессивных НХЛ (59 пациентов). Согласно полученным нами данным, по результатам обследования 209 человек (наибольшая группа пациентов в опубликованных источниках), ИКД при ЛХ (111 пациентов) выше, чем при НХЛ (98 пациентов), в том числе при агрессивных, индолентных и из клеток мантийной зоны ($p < 0{,}0002$). Статистически значимое отличие сохраняется после исключения ЛУ средостения и корней легких ($p < 0{,}003$). По данным T. Kwee с соавт. [7], ИКД ($\times 10^{-3}$ мм^2/с) при агрессивных НХЛ (16 пациентов) не отличается от ИКД при индолентных НХЛ (16 пациентов) – 0,74 и 0,67 соответственно. X. Wu с соавт. [26] не выявили отличий ИКД при ДБКЛ (30 пациентов) и фолликулярной лимфоме (11 пациентов). В то же время, по данным F. Mosavi с соавт. [12], ИКД поражений при ЛХ (12 пациентов) составил 1,02, при агрессивных НХЛ (20 пациентов) – 0,82, при индолентных НХЛ (9 пациентов) – 0,60. ИКД при индолентных НХЛ статистически значимо ниже, чем в двух других группах. Это соответствует полученным нами данным на значительно больших группах пациентов: ИКД при ЛХ ($n = 111$) выше, чем при НХЛ ($n = 98$, $p < 0{,}0002$); при агрессивных НХЛ ($n = 55$) и ДВКЛ ($n = 53$) выше, чем при индолентных ($n = 18$) и из клеток мантийной зоны НХЛ ($n = 25$) ($p < 0{,}02$); ИКД при индолентных и из клеток мантийной зоны НХЛ не отличается ($p = 0{,}67$). Более высокому значению ИКД при ЛХ и ДВКЛ по сравнению с индолентными и из клеток мантийной зоны НХЛ соответствует более низкая клеточность первых, что позволяет объяснить полученные нами на клеточном уровне данные.

На заключительном этапе нашего исследования предпринята попытка найти единое пороговое значение ИКД для дифференциации нормальных и пораженных ЛУ у пациентов с лимфомой. Однако большая гетерогенность значений ИКД (их зависимость от различных технических и биологических факторов), продемонстрированная в нашем исследовании, показывает, что решение этой задачи едва ли возможно. Это подтверждается результатами других исследований. Так, пороговые значения ИКД для дифференциации доброкачественной лимфаденопатии и злокачественного поражения ЛУ средостения (у части пациентов имела место лимфома) в работах разных авторов составили ($\times 10^{-3}$ мм^2/с) 1,1 [10], 1,33 [27], 1,75 [28], 1,97 [9]. Значительные отличия между пороговыми значениями можно объяснить различием технических параметров сканирования и гетерогенностью включенных заболеваний. В двух работах авторами проведена дифференциальная диагностика саркоидоза и лимфом, с примерно равным соотношением случаев ЛХ и НХЛ, близкими значениями используемых b факторов, однако получены наиболее отличающиеся поро-

говые значения – 1,1 и 1,97 [9, 10]. Следовательно, найти единое пороговое значение ИКД проблематично даже для одной анатомической группы ЛУ. Вместе с тем для диагностики поражения ЛУ при лимфоме высокую эффективность в наших [2, 3, 6] и других исследованиях [29, 30] показал критерий размеров. В заключение отметим, что при интерпретации ПЭТ у пациентов с лимфомой единое пороговое значение стандартизованного показателя накопления также не используют.

Выводы

1. Установлено влияние ряда технических факторов ДВИ-сканирования на значения ИКД пораженных ЛУ при лимфоме: при использовании встроенной катушки ИКД выше, чем при использовании многоканальной поверхностной ($p < 0{,}0001$); методика параллельной визуализации не влияет на значения ИКД ($p = 0{,}56$); ИКД подвижных при дыхании ЛУ (средостения и корней легких) при использовании респираторного триггеринга выше, чем при свободном дыхании ($p < 0{,}02$). Для повышения качества ДВИ-изображений, стандартизации влияния технических параметров сканирования на значения ИКД целесообразно проводить ДВИ-сканирование с использованием поверхностной катушки, методики параллельной визуализации, при свободном дыхании.

2. В зависимости от анатомической локализации пораженных ЛУ наиболее высокие значения ИКД ($\times 10^{-3}$ мм^2/с) получены в ЛУ корней легких (1,429 ± 0,396) и средостения (1,338 ± 0,313), более низкие (в порядке уменьшения значений) – в ЛУ брюшной полости (1,011 ± 0,298), подмышечных (0,840 ± 0,196), шеи (0,834 ± 0,259), паховых (0,753 ± 0,128), подвздошных (0,738 ± 0,129). ИКД ЛУ средостения и корней легких статистически значимо не отличаются ($p = 0{,}37$), но выше, чем в остальных анатомических группах ($p < 0{,}01$). ИКД ЛУ брюшной полости выше, чем в остальных группах ($p < 0{,}004$), кроме средостения и корней легких. ИКД ЛУ подмышечных выше, чем подвздошных и паховых ($p < 0{,}035$). ИКД ЛУ шеи и подмышечных, а также шеи, подвздошных и паховых между собой не отличаются ($p > 0{,}3$).

Установлено выраженное отличие ИКД ($\times 10^{-3}$ мм^2/с) пораженных ЛУ средостения и корней легких от ИКД ЛУ других анатомических групп у того же пациента (средняя разница – 0,382 ± 0,292). Средняя разница ИКЛ ЛУ средостения и корней легких у того же пациента составила 0,360 ± 0,276. Отличие ИКД групп ЛУ вне средостения и корней легких у того же пациента значительно ниже – 0,069 ± 0,051.

Таким образом, ИКД пораженных ЛУ средостения и корней легких выше, чем в остальных анатомических группах, как при сравнении между пациентами, так и при сравнении разных групп ЛУ у одного пациента.

3. ИКД ($\times 10^{-3}$ мм^2/с) пораженных ЛУ при ЛХ составил 1,168 ± 0,372, что выше, чем при всех других морфологических вариантах лимфом ($p < 0{,}0002$). ИКД при агрессивных НХЛ – 0,948 ± 0,315, при ДВКЛ – 0,951 ± 0,320, что выше, чем при индолентных (0,756 ± 0,246) и из клеток мантийной зоны НХЛ (0,759 ± 0,211), $p < 0{,}02$. ИКД при индолентных и из клеток мантийной зоны НХЛ не отличаются ($p = 0{,}67$). После исключения из расчета ЛУ средостения и корней легких, ИКД которых может быть артефактно завышен под влиянием сердечно-сосудистой пульсации, ИКД при ЛХ остается выше, чем при всех других морфологических вариантах лимфом ($p < 0{,}003$). Следовательно, наряду с сердечно-сосудистой пульсацией высокие значения ИКД при ЛХ могут быть обусловлены другими причинами.

4. При ЛХ более высокому значению ИКД пораженных ЛУ средостения и корней легких соответствует более низкая клеточность в гистологическом материале, чем в пораженных ЛУ других анатомических групп ($p < 0{,}021$). Более высокому значению ИКД пораженных ЛУ вне средостения и корней легких при ЛХ и ДВКЛ соответствует более низкая клеточность, чем у индолентных и мантийной зоны НХЛ ($p < 0{,}0001$). Следовательно, установленные отличия значений ИКД пораженных ЛУ у пациентов с ЛХ в зависимости от локализации в средостении и корнях легких или в других анатомических зонах, а также отличия ИКД при различных морфологических вариантах лимфом могут быть хотя бы частично объяснены отличием клеточности, поскольку высокие значения ИКД связывают с низкой клеточностью опухолей.

5. Учитывая установленные статистически значимые отличия ИКД пораженных ЛУ в зависимости от анатомической локализации и морфологического варианта лимфомы, а также влияние

на значения ИКД различных технических факторов ДВИ-сканирования, определить единое пороговое значение ИКД для дифференциации пораженных и нормальных ЛУ не представляется возможным. Использование для этой цели такого критерия, как размер ЛУ по короткой оси, показавшего эффективность в предыдущих исследованиях, является наиболее оптимальным.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Diffusion weighted whole body imaging with background body signal suppression (DWIBS): technical improvement using free breathing, STIR and high resolution 3D display / T. Takahara [et al.] // Radiat. Med. – 2004. – Vol. 22, N 4. – P. 275–282.
2. Сравнение возможностей диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии всего тела и рентгеновской компьютерной томографии при стадировании лимфом / С. А. Хоружик [и др.]. // Онкол. журн. – 2015. – Т. 9, № 1. – С. 43–48.
3. Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография всего тела и позитронная эмиссионная томография, комбинированная с компьютерной томографией, при стадировании лимфом / С. А. Хоружик [и др.] // Вестн. рентгенологии и радиологии. – 2019. – Т. 100, № 6. – С. 321–334.
4. Хоружик, С. А. Проспективное исследование прогностической эффективности диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии при лимфоме Ходжкина / С. А. Хоружик, Э. А. Жаврид // Онкол. журн. – 2020. – Т. 14, № 2–3. – С. 52–67.
5. Хоружик, С. А. Проспективное исследование прогностической эффективности диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии при неходжкинских лимфомах / С. А. Хоружик, Э. А. Жаврид // Евраз. онкол. журн. – 2020. – Т. 8, № 3. – С. 220–238.
6. Сравнение диагностической эффективности магнитно-резонансной томографии с диффузионно-взвешенным исследованием всего тела и позитронной эмиссионной томографии/компьютерной томографии при определении степени регрессии лимфомы после завершения химиотерапии: Минская шкала и шкала Довиль / С. А. Хоружик [и др.] // Лучевая диагностика и терапия. – 2020. – № 1. – С. 78–92.
7. ADC measurements in the evaluation of lymph nodes in patients with non-Hodgkin lymphoma: feasibility study / T. C. Kwee [et al.] // MAGMA. – 2011. – Vol. 24, N 1. – P. 1–8. https://doi.org/10.1007/s10334-010-0226-7
8. Characterization of mediastinal lymphadenopathy with diffusion-weighted imaging / A. A. Abdel Razek [et al.] // Magn. Reson. Imaging. – 2011. – Vol. 29, N 2. – P. 167–172. https://doi.org/10.1016/j.mri.2010.08.002
9. Differentiation of lymphoma versus sarcoidosis in the setting of mediastinal-hilar lymphadenopathy: assessment with diffusion-weighted MR imaging / S. Gümüştaş [et al.] // Sarcoidosis Vasc. Diffuse Lung Dis. – 2013. – Vol. 30, N 1. – P. 52–59.
10. Дифференциальная диагностика медиастинальной лимфаденопатии при лимфоме и саркоидозе с помощью диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии / А. В. Сударкина // Лучевая диагностика и терапия. – 2020. – № 3. – С. 56–62.
11. Diagnostic ability of apparent diffusion coefficients for lymphomas and carcinomas in the pharynx / M. Sumi [et al.] // Eur. Radiol. – 2007. – Vol. 17, N 10. – P. 2631–2637. https://doi.org/10.1007/s00330-007-0588-z
12. Whole-body diffusion-weighted MRI and (18)F-FDG PET/CT can discriminate between different lymphoma subtypes / F. Mosavi [et al.] // Clin. Radiol. – 2015. – Vol. 70, N 11. – P. 1229–1236. https://doi.org/10.1016/j.crad.2015.06.087
13. Improving lymph node characterization in staging malignant lymphoma using first-order ADC texture analysis from whole-body diffusion-weighted MRI / K. N. De Paepe [et al.] // J. Magn. Reson. Imaging. – 2018. – Vol. 48, N 4. – P. 897–906. https://doi.org/10.1002/jmri.26034
14. Whole-body diffusion-weighted MR and FDG-PET/CT in Hodgkin lymphoma: predictive role before treatment and early assessment after two courses of ABVD / D. Albano [et al.] // Eur. J. Radiol. – 2018. – Vol. 103. – P. 90–98. https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.04.014
15. Хоружик, С. А. Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография нормальных лимфатических узлов / С. А. Хоружик // Евраз. онкол. журн. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 30–39.
16. Корреляция магнитно-резонансно-томографического измеряемого коэффициента диффузии с показателем клеточности в гистологическом материале при различных морфологических вариантах лимфом / С. А. Хоружик [и др.] // Проблемы здоровья и экологии. – 2021. – Т. 18, № 2. – С. 102–112.
17. Meyer, H. J. ADC histogram analysis of muscle lymphoma-correlation with histopathology in a rare entity / H. J. Meyer, N. Pazaitis, A. Surov // Br. J. Radiol. – 2018. – Vol. 91, N 1090. – Art. 20180291. https://doi.org/10.1259/bjr.20180291
18. Pitfalls in whole body MRI with diffusion weighted imaging performed on patients with lymphoma: What radiologists should know / D. Albano [et al.] // Magn. Reson. Imaging. – 2016. – Vol. 34, N 7. – P. 922–931. https://doi.org/10.1016/j.mri.2016.04.023
19. Исследование внутриоператорской и межоператорской воспроизводимости измеряемого коэффициента диффузии при лимфомах / С. А. Хоружик [и др.]. // Онкол. журн. – 2016. – Т. 10, № 3. – С. 77–85.
20. Diffusion-weighted imaging outside the brain: Consensus statement from an ISMRM-sponsored workshop / B. Taouli [et al.] // J. Magn. Reson. Imaging. – 2016. – Vol. 44, N 3. – P. 521–540. https://doi.org/10.1002/jmri.25196
21. Hamilton, J. Recent advances in parallel imaging for MRI / J. Hamilton, D. Franson, N. Seiberlich // Prog. Nucl. Magn. Reson. Spectrosc. – 2017. – Vol. 101. – P. 71–95. https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2017.04.002
22. The role of parallel diffusion-weighted imaging and apparent diffusion coefficient (ADC) map values for evaluating breast lesions: preliminary results / G. Jin [et al.] // Acad. Radiol. – 2010. – Vol. 17, N 4. – P. 456–463. https://doi.org/10.1016/j.acra.2009.12.004
23. Evaluation of image quality of DWIBS versus DWI sequences in thoracic MRI at 3T / C. Mesmann [et al.] // Magn. Reson. Imaging. – 2014. – Vol. 32, N 10. – P. 1237–1241. https://doi.org/10.1016/j.mri.2014.08.015

24. Шепелева, Л. П. Компьютерно-томографическая картина неизмененных лимфатических узлов средостения у детей, не инфицированных микобактериями туберкулеза / Л. П. Шепелева, И. Е. Тюрин // Вестн. рентгенологии и радиологии. – 2014. – № 4. – С. 26–30.

25. Application of DWIBS in malignant lymphoma: correlation between ADC values and Ki-67 index / M. Sun [et al.] // Eur. Radiol. – 2018. – Vol. 28, N 4. – P. 1701–1708. https://doi.org/10.1007/s00330-017-5135-y

26. Differentiation of diffuse large B-cell lymphoma from follicular lymphoma using texture analysis on conventional MR images at 3.0 Tesla / X. Wu [et al.] // Acad. Radiol. – 2016. – Vol. 23, N 6. – P. 696–703. https://doi.org/10.1016/j.acra.2016.01.012

27. Apparent diffusion coefficient measurement in mediastinal lymphadenopathies: differentiation between benign and malignant lesions / F. E. Ustabasioglu [et al.] // J. Clin. Imaging Sci. – 2017. – Vol. 7. – Art. 12. https://doi.org/10.4103/jcis.JCIS_84_16

28. Diffusion-weighted quantitative MRI to diagnose benign conditions from malignancies of the anterior mediastinum: Improvement of diagnostic accuracy by comparing perfusion-free to perfusion-sensitive measurements of the apparent diffusion coefficient / A. M. Priola [et al.] // J. Magn. Reson. Imaging. – 2016. – Vol. 44, N 3. – P. 758–769. https://doi.org/10.1002/jmri.25203

29. Whole-body MRI, including diffusion-weighted imaging, for staging lymphoma: comparison with CT in a prospective multicenter study / T. C. Kwee [et al.] // J. Magn. Reson. Imaging. – 2014. – Vol. 40, N 1. – P. 26–36. https://doi.org/10.1002/jmri.24356

30. Ionising radiation-free whole-body MRI versus (18)F-fluorodeoxyglucose PET/CT scans for children and young adults with cancer: a prospective, non-randomised, single-centre study / C. Klenk [et al.] // Lancet Oncol. – 2014. – Vol. 15, N 3. – P. 275–285. https:// https://doi.org/10.1016/S1470-2045(14)70021-X

References

1. Takahara T., Imai Y., Yamashita T., Yasuda S., Nasu S., van Cauteren M. Diffusion weighted whole body imaging with background body signal suppression (DWIBS): technical improvement using free breathing, STIR and high resolution 3D display. *Radiation Medicine*, 2004, vol. 22, no. 4, pp. 275–282.

2. Khoruzhik S. A., Zhavrid E. A., Sachivko N. V., Portasova N. P., Karman E. I., Karman A. V. Possibilities of whole-body diffusion-weighted magnetic resonance imaging compared to X-ray computed tomography in staging lymphoma. *Onkologicheskii zhurnal* [Oncological journal], 2015, vol. 9, no. 1, pp. 43–48 (in Russian).

3. Khoruzhik S. A., Zhavrid E. A., Dzyuban A. V., Poddubnyi K. V., Sukolinskaya E. V., Kalenik O. A. Whole body diffusion-weighted magnetic resonance imaging and positron emission tomography/computed tomography for staging of lymphomas. *Vestnik rentgenolgogi i radiologii* [Bulletin of radiology and radiology], 2019, vol. 100, no. 6, pp. 321–334 (in Russian).

4. Khoruzhik S. A., Zhavrid E. A. Prospective study of prognostic effectiveness of diffusion-weighted magnetic resonance imaging in Hodgkin lymphoma. *Onkologicheskii zhurnal* [Oncological journal], 2020, vol. 14, no. 2–3, pp. 52–67 (in Russian).

5. Khoruzhik S. A., Zhavrid E. A. Prospective study of prognostic effectiveness of diffusion-weighted magnetic resonance imaging in non-Hodgkin lymphomas. *Evraziiskii onkologicheskii zhurnal* [Eurasian oncological journal], 2020, vol. 8, no. 3, pp. 220–238 (in Russian).

6. Khoruzhik S. A., Zhavrid E. A., Dzyuban A. V., Sukolinskaya E. V., Kalenik O. A. Comparison of the diagnostic effectiveness of whole body magnetic resonance imaging with diffusion weighted imaging and positron emission tomography/computed tomography in determining tumor response in lymphoma after the end of chemotherapy: Minsk scale and Deauville scale. *Luchevaya diagnostika i terapiya* [Radiation diagnostics and therapy], 2020, no. 1, pp. 78–92 (in Russian).

7. Kwee T. C., Ludwig I., Uiterwaal C. S., van Ufford H. M. E., Vermoolen M. A., Fijnheer R., Bierings M. B., Nievelstein R. A. J. ADC measurements in the evaluation of lymph nodes in patients with non-Hodgkin lymphoma: feasibility study. *MAGMA*, 2011, vol. 24, no. 1, pp. 1–8. https://doi.org/10.1007/s10334-010-0226-7

8. Abdel Razek A. A., Elkammary S., Elmorsy A. S., Elshafey M., Elhadedy T. Characterization of mediastinal lymphadenopathy with diffusion-weighted imaging. *Magnetic Resonance Imaging*, 2011, vol. 29, no. 2, pp. 167–172. https://doi.org/10.1016/j.mri.2010.08.002

9. Gümüştaş S., Inan N., Akansel G., Başyïğït I., Cïftçi E. Differentiation of lymphoma versus sarcoidosis in the setting of mediastinal-hilar lymphadenopathy: assessment with diffusion-weighted MR imaging. *Sarcoidosis Vascular Diffuse Lung Disease*, 2013, vol. 30, no. 1, pp. 52–59.

10. Sudarkina A. V., Dergilev A. P., Kozlov V. V., Fokina Yu. A., Klimova I. P., Gorbunov N. A., Shalygin K. V. Differential diagnosis of mediastinal lymphadenopathy in lymphoma and sarcoidosis using magnetic resonance imaging. *Luchevaya diagnostika i terapiya* [Radiation diagnostics and therapy], 2020, no. 3, pp. 56–62 (in Russian).

11. Sumi M., Ichikawa Y., Nakamura T. Diagnostic ability of apparent diffusion coefficients for lymphomas and carcinomas in the pharynx. *European Radiology*, 2007, vol. 17, no. 10, pp. 2631–2637. https://doi.org/10.1007/s00330-007-0588-z

12. Mosavi F., Wassberg C., Selling J., Molin D., Ahlström H. Whole-body diffusion-weighted MRI and (18)F-FDG PET/CT can discriminate between different lymphoma subtypes. *Clinical Radiology*, 2015, vol. 70, no. 11, pp. 1229–1236. https://doi.org/10.1016/j.crad.2015.06.087

13. De Paepe K. N., De Keyzer F., Wolter P., Bechter O., Dierickx D., Janssens A. [et al.]. Improving lymph node characterization in staging malignant lymphoma using first-order ADC texture analysis from whole-body diffusion-weighted MRI. *Journal Magnetic Resonance Imaging*, 2018, vol. 48, no. 4, pp. 897–906. https://doi.org/10.1002/jmri.26034

14. Albano D., Patti C., Matranga D., Lagalla R., Midiri M., Galia M. Whole-body diffusion-weighted MR and FDG-PET/CT in Hodgkin lymphoma: predictive role before treatment and early assessment after two courses of ABVD. *European Journal of Radiology*, 2018, vol. 103, pp. 90–98. https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.04.014

15. Khoruzhik S. A. Diffusion-weighted magnetic resonance imaging of normal lymph nodes. *Evraziiskii onkologicheskii zhurnal* [Eurasian oncological journal], 2020, vol. 8, no. 1, pp. 30–39 (in Russian).

16. Khoruzhik S. A., Aniskevich O. R., Zhavrid E. A. Correlation of the magnetic resonance imaging apparent diffusion coefficient with the cellularity in the histological material in different morphological types of lymphomas. *Problemy zdorov'ya i ekologii* [Health and environmental issues], 2021, vol. 18, no. 2, pp. 102–112 (in Russian).

17. Meyer H. J., Pazaitis N., Surov A. ADC histogram analysis of muscle lymphoma-correlation with histopathology in a rare entity. *British Journal of Radiology*, 2018, vol. 91, no. 1090, art. 20180291. https://doi.org/10.1259/bjr.20180291

18. Albano D., La Grutta L., Grassedonio E., Patti C., Lagalla R., Midiri M., Galia M. Pitfalls in whole body MRI with diffusion weighted imaging performed on patients with lymphoma: What radiologists should know. *Magnetic Resonance Imaging*, 2016, vol. 34, no. 7, pp. 922–931. https://doi.org/10.1016/j.mri.2016.04.023

19. Khoruzhik S. A., Zhavrid E. A., Karman A. V., Shimanets S. V., Yatskov N. N. Investigation of intra- and inter-observer reproducibility of the apparent diffusion coefficient in lymphomas. *Onkologicheskii zhurnal* [Oncological journal], 2016, vol. 10, no. 3, pp. 77–85 (in Russian).

20. Taouli B., Beer A. J., Chenevert T., Collins D., Lehman C., Matos C. [et al.] Diffusion-weighted imaging outside the brain: Consensus statement from an ISMRM-sponsored workshop. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2016, vol. 44, no. 3, pp. 521–540. https://doi.org/10.1002/jmri.25196

21. Hamilton J., Franson D., Seiberlich N. Recent advances in parallel imaging for MRI. *Progress in nuclear magnetic resonance spectroscopy*, 2017, vol. 101, pp. 71–95. https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2017.04.002

22. Jin G., An N., Jacobs M. A., Li K. The role of parallel diffusion-weighted imaging and apparent diffusion coefficient (ADC) map values for evaluating breast lesions: preliminary results. *Academic Radiology*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 456–463. https://doi.org/10.1016/j.acra.2009.12.004

23. Mesmann C., Sigovan M., Berner L.-P., Abergel A., Tronc F., Berthezène Y., Douek P., Boussel L. Evaluation of image quality of DWIBS versus DWI sequences in thoracic MRI at 3T. *Magnetic Resonance Imaging*, 2014, vol. 32, no. 10, pp. 1237–1241. https://doi.org/10.1016/j.mri.2014.08.015

24. Shepeleva L. P., Tyurin I. E. Computed tomography pattern of unchanged mediastinal lymph nodes in children with uninfected Mycobacterium tuberculosis. *Vestnik rentgenologii i radiologii* [Bulletin of radiology and radiology], 2014, no. 4, pp. 26–30 (in Russian).

25. Sun M., Cheng J., Zhang Y., Bai J., Wang F., Meng Y., Li Z. Application of DWIBS in malignant lymphoma: correlation between ADC values and Ki-67 index. *European Radiology*, 2018, vol. 28, no. 4, pp. 1701–1708. https://doi.org/10.1007/s00330-017-5135-y

26. Wu X., Sikiö M., Pertovaara H., Järvenpää R., Eskola H., Dastidar P., Kellokumpu-Lehtinen P.-L. Differentiation of diffuse large B-cell lymphoma from follicular lymphoma using texture analysis on conventional MR Images at 3.0 Tesla. *Academic Radiology*, 2016, vol. 23, no. 6, pp. 696–703. https://doi.org/10.1016/j.acra.2016.01.012

27. Ustabasioglu F. E., Samanci C., Alis D., Samanci N. S., Kula O., Olgun D. C. Apparent diffusion coefficient measurement in mediastinal lymphadenopathies: differentiation between benign and malignant lesions. *Journal of Clinical Imaging Sciences*, 2017, vol. 7, art. 12. https://doi.org/10.4103/jcis.JCIS_84_16

28. Priola A. M., Priola S. M., Gned D., Piacibello E., Sardo D., Parvis G., Torti D., Ardissone F., Veltri A. Diffusion-weighted quantitative MRI to diagnose benign conditions from malignancies of the anterior mediastinum: Improvement of diagnostic accuracy by comparing perfusion-free to perfusion-sensitive measurements of the apparent diffusion coefficient. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2016, vol. 44, no. 3, pp. 758–769. https://doi.org/10.1002/jmri.25203

29. Kwee T. C., Vermoolen M. A., Akkerman E. A., Kersten M. J., Fijnheer R., Ludwig I. [et al.] Whole-body MRI, including diffusion-weighted imaging, for staging lymphoma: comparison with CT in a prospective multicenter study. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2014, vol. 40, no. 1, pp. 26–36. https://doi.org/10.1002/jmri.24356

30. Klenk C., Gawande R., Uslu L., Khurana A., Qiu D., Quon A., Donig J., Rosenberg J., Luna-Fineman S., Moseley M., Daldrup-Link H. E. Ionising radiation-free whole-body MRI versus (18)F-fluorodeoxyglucose PET/CT scans for children and young adults with cancer: a prospective, non-randomised, single-centre study. *Lancet Oncology*, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 275–285. https:// https://doi.org/10.1016/S1470-2045(14)70021-X

Информация об авторах

Хоружик Сергей Анатольевич – канд. мед. наук, доцент. Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова (223040, а/г Лесной, Минский р-н, Республика Беларусь). E-mail: skharuzhyk@nld.by. https://orcid.org/0000-0002-0010-8324

Карман Андрей Вениаминович – канд. мед. наук, доцент. Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова (223040, а/г Лесной, Минский р-н, Республика Беларусь). E-mail: carman@tut.by. https://orcid.org/0000-0002-3045-3882

Жаврид Эдвард Антонович – д-р мед. наук, профессор. Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова (223040, а/г Лесной, Минский р-н, Республика Беларусь). E-mail: e.zhavrid@gmail.com. https://orcid.org/0000-0003-2194-4820

Information about the authors

Siarhei A. Kharuzhyk – Ph. D. (Med.), Associate Professor. N. N. Alexandrov National Cancer Centre (223040, Lesnoy, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: skharuzhyk@nld.by. https://orcid.org/0000-0002-0010-8324

Andrey V. Karman – Ph. D. (Med.), Associate Professor. N. N. Alexandrov National Cancer Centre (223040, Lesnoy, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: carman@tut.by. https://orcid.org/0000-0002-3045-3882

Edward A. Zhavrid – D. Sc. (Med.), Professor. N. N. Alexandrov National Cancer Centre (223040, Lesnoy, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: e.zhavrid@gmail.com. https://orcid.org/0000-0003-2194-4820