



Особенности оценки диффузионно-взвешенных изображений и результатов ASL-перфузии почек при остром повреждении почек

Шкуратова Ю.Ю., Морозова Т.Г.

ФГБОУ ВО «Смоленский государственный медицинский университет» Минздрава России,
ул. Крупской, 28, Смоленск, 214019, Российская Федерация

Шкуратова Юлия Юрьевна, аспирант кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии с курсом дополнительного профессионального образования ФГБОУ ВО «Смоленский государственный медицинский университет» Минздрава России;
<http://orcid.org/0009-0000-0153-6040>

Морозова Татьяна Геннадьевна, д. м. н., доцент, заведующая кафедрой лучевой диагностики и лучевой терапии с курсом дополнительного профессионального образования ФГБОУ ВО «Смоленский государственный медицинский университет» Минздрава России;
<http://orcid.org/0000-0003-4983-5300>

Резюме

Цель: оценить особенности диффузионно-взвешенных изображений (ДВИ) и результатов перфузии почек с маркированием артериальных спинов (arterial spin labeling, ASL) при остром повреждении почек (ОПП).

Материал и методы. В реанимационном отделении ОГБУЗ «Клиническая больница № 1» (г. Смоленск) с 2021 по 2024 гг. обследованы 58 пациентов с ОПП. Всем больным в течение 1–3 сут проводили магнитно-резонансную томографию почек с включением последовательностей ДВИ и ASL-перфузии, а также ультразвуковую доплерографию. Группа контроля была сформирована из 55 здоровых добровольцев с целью стандартизации полученных результатов.

Результаты. Проведен анализ данных в сопоставлении с причинным фактором ОПП. Статистические результаты имели пороги отсечения, позволяющие прогнозировать причину ОПП, но требовался комплексный анализ количественного критерия ASL-перфузии почек, качественного и количественного критериев ДВИ ($r=0,947$). Показатели ASL-перфузии при всех этиологических причинах в сравнении с нормой были статистически значимы ($r=0,995$). Определение причинного фактора ОПП важно для тактики ведения пациента: при прerenальной причине необходимо активное введение плазмозамещающих растворов, при ренальной – рестриктивная тактика инфузионной терапии. Увеличение показателей ASL-перфузии почек положительно сказывалось на клинико-лабораторной картине пациентов ($r=0,903$).

Заключение. Особенностью совместного применения ДВИ и ASL-перфузии почек при ОПП является комплексная оценка качественного и количественного критериев по данным ДВИ и количественного – по данным ASL-перфузии. Комплексные результаты ДВИ и ASL-перфузии почек позволяют прогнозировать причину ОПП.

Ключевые слова: острое повреждение почек; ОПП; диффузионно-взвешенные изображения; ДВИ; ASL-перфузия; магнитно-резонансная томография; МРТ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Шкуратова Ю.Ю., Морозова Т.Г. Особенности оценки диффузионно-взвешенных изображений и результатов ASL-перфузии почек при остром повреждении почек. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2024; 105(4): 194–201. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-4-194-201>

Для корреспонденции: Шкуратова Юлия Юрьевна, E-mail: juliyamilosh@yandex.ru

Статья поступила 18.09.2024

После доработки 02.11.2024

Принята к печати 05.11.2024

Features of Evaluating Renal Diffusion-Weighted Images and ASL-Perfusion Results in Acute Kidney Injury

Yulia Yu. Shkuratova, Tatiana G. Morozova

Smolensk State Medical University,
ul. Krupskoy, 28, Smolensk, 214019, Russian Federation

Yulia Yu. Shkuratova, Postgraduate, Chair of Radiation Diagnostics and Therapy with a Course of Additional Professional Education, Smolensk State Medical University;
<http://orcid.org/0009-0000-0153-6040>

Tatiana G. Morozova, Dr. Med. Sc., Associate Professor, Chief of Chair of Radiation Diagnostics and Therapy with a Course of Additional Professional Education, Smolensk State Medical University;
<http://orcid.org/0000-0003-4983-5300>

Abstract

Objective: to evaluate the features of renal diffusion-weighted images (DWI) and arterial spin labeling (ASL) perfusion results in acute kidney injury (AKI).

Material and methods. In the intensive care unit of Clinical Hospital No. 1 (Smolensk), 58 AKI patients were examined from 2021 to 2024. All patients underwent renal magnetic resonance imaging for 1–3 days with the inclusion of DWI sequences and ASL perfusion as well as ultrasound dopplerography. The control group was formed from 55 healthy volunteers to standardize the obtained results.

Results. The data were analyzed in comparison with AKI causal factor. The statistical results had cut-off thresholds that allowed predicting the cause of AKI, but a comprehensive analysis of the quantitative criterion of renal ASL perfusion, qualitative and quantitative criteria of DWI ($r=0.947$) was required. ASL perfusion indicators for all etiological causes were statistically significant in comparison with the normal ones ($r=0.995$). The determination of AKI causal factor was important for the subsequent management of patients: for a prerenal cause, active administration of plasma-substituting solutions, and for a renal one, restrictive infusion therapy tactics were needed. It was also noted that an increase in kidney ASL perfusion values had a positive effect on clinical and laboratory picture of AKI patients ($r=0.903$).

Conclusion. The feature of joint application of renal DWI and ASL perfusion in AKI is the comprehensive assessment of qualitative and quantitative criteria according to DWI data, and quantitative criterion according to ASL perfusion data. In assessing DWI, color mapping should be used. The complex results of renal DWI and ASL perfusion allow predicting AKI cause.

Keywords: acute kidney injury; AKI; diffusion-weighted images; DWI; ASL-perfusion; magnetic resonance imaging; MRI.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

For citation: Shkuratova YuYu, Morozova TG. Features of evaluating renal diffusion-weighted images and ASL perfusion results in acute kidney injury. Journal of Radiology and Nuclear Medicine. 2024; 105(4): 194–201 (in Russian). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-4-194-201>

For corresponding: Yulia Yu. Shkuratova, E-mail: juliyamilosh@yandex.ru

Received September 18, 2024

Revised November 2, 2024

Accepted November 5, 2024

Введение / Introduction

Термин «острая почечная недостаточность» на данный момент не рекомендуется к применению, поскольку характеризует крайнюю стадию острого повреждения почек (ОПП) по диагностическим критериям KDIGO (Kidney Disease: Improving Global Outcomes) с вовлечением всех нефронов в патологический процесс [1, 2]. Его необходимо использовать только в отношении наиболее тяжелых случаев ОПП [3]. Поэтому патологический процесс в почках, возникающий под воздействием ренальных или экстраренальных повреждающих факторов, принято называть «острым повреждением почек» [1–4]. На основании критериев гипоперфузии почек, непосредственно интерстициальных изменений, нарушения архитектоники сосудов либо обструктивного процесса причины возникновения данной патологии могут быть разделены на прerenальные (функциональные), интarenальные (структурные) и постренальные (обтурационные) [2, 4].

При прerenальной причине ОПП происходит снижение почечного кровотока, уменьшается

гидростатическое давление в капиллярной сети клубочков, падает скорость клубочковой фильтрации (СКФ). Следует отметить, что прerenальное функциональное заболевание протекает в условиях, когда почки сами по себе здоровы, анализ мочи обычно нормален, за исключением появления повышенного числа гиалиновых и зернистых цилиндров. Почка отвечает на сниженную перфузию интенсивной реабсорбцией солей и воды для сохранения объема циркулирующей крови [5]. ОПП, вызванное внутрипочечными процессами, характеризуется потерей целостности и функции клетки почечного канальца. «Острый канальцевый некроз» остается наиболее приемлемым термином для описания этого сложного клинического нарушения [3, 5]. Таким образом, происходит изменение внутри- и межклеточной составляющих, причем длительность и тяжесть ишемических поражений существенно отличаются: у одних больных всего несколько минут ишемии сопровождаются острым некрозом канальцев, тогда как у других даже длительная ишемия вызывает лишь

проходящую дисфункцию почек [4]. Постренальное ОПП может иметь две причины (внепочечную и внутрпочечную) и может протекать также как острый некроз канальцев [3].

«Золотым стандартом» в постановке диагноза ОПП являются лабораторные методы исследования, но маркеры проявлений ОПП могут запаздывать, а процесс в почках – протекать активно на фоне нормальных показателей [1, 2, 6, 7]. Следовательно, рассматривая возможности стандартного лабораторно-инструментального алгоритма, требуется расширить диагностический минимум обследования пациентов с ОПП, включив такие методы исследования, которые позволили бы ответить на вопросы об изменениях в структуре почки до проявлений в лабораторных исследованиях.

Методика перфузии почек с маркированием артериальных спинов (arterial spin labeling, ASL) основана на магнитном маркировании протонов водорода молекул воды артериальной крови, позволяющем оценить перфузию органа [8, 9]. Для диагностики патологии почек оценка ASL-перфузии актуальна за счет архитектоники почечного кровотока (приносящая, выносящая артериолы, капсула Боумена–Шумлянского). Диффузионно-взвешенные изображения (ДВИ) также применяются в диагностике заболеваний почек. Хорошо изучены показатели ДВИ и измеряемого коэффициента диффузии (ИКД) при хронической болезни почек [10, 11]. Данные методы являются перспективными, неинвазивными, простыми в применении, незначительно увеличивающими диагностический алгоритм. Поэтому необходимо более детальное их изучение для внедрения в рутинную практику врачей.

Цель – оценить особенности ДВИ и результатов ASL-перфузии почек при ОПП.

Материал и методы / Material and methods

Обследованы 58 пациентов с ОПП, поступивших в реанимационное отделение ОГБУЗ «Клиническая больница № 1» (г. Смоленск). Среди них было 38 (65,5%) мужчин и 20 (34,5%) женщин, средний возраст составил 47±8,9 года. Наблюдение проводилось с 2021 по 2024 гг. Распределение пациентов в соответствии с клинической причиной ОПП представлено в таблице 1. Группа контроля, сформированная с целью стандартизации полученных результатов ДВИ и ASL-перфузии почек, была представлена 55 добровольцами без ОПП. Согласие на участие в исследовании получено от пациентов или их законных представителей.

В обязательный диагностический минимум входило проведение ультразвукового исследования (УЗИ) почек с доплерографией. Всем пациентам в течение 1–3 сут пребывания в стационаре выполнена МРТ почек с включением последовательностей ДВИ и ASL-перфузии (рис. 1). Исследование проводилось на МР-томографе Vantage Titan 1.5 T (Toshiba, Япония), 16-канальная абдоминальная катушка располагалась на передней брюшной стенке, что позволяло захватывать зону интереса – область почек. В ходе МРТ-исследования врач имеет возможность получить обширные и точные изображения органа в разных проекциях, провести оценку мягких тканей, сосудов, определить локализацию повреждения или опухолей.

ДВИ актуальны для патологии почек в силу особенностей их функции (азото-, водо-, электролито-, кислотовыделительной, осморегули-

Таблица 1

Распределение пациентов в зависимости от этиологии острого повреждения почек (ОПП), n (%)

Table 1

Distribution of patients depending on etiology of acute kidney injury (AKI), n (%)

Клиническая причина ОПП / AKI clinical cause	Пол / Gender		Всего / Total
	Мужской / Male	Женский / Female	
Острое нарушение мозгового кровообращения / Acute stroke	9 (15,5)	7 (12,1)	16 (27,6)
Кардиогенный шок / Cardiogenic shock	12 (20,7)	5 (8,6)	17 (29,3)
Синдром быстро прогрессирующего гломерулонефрита / Rapidly progressive glomerulonephritis	3 (5,2)	1 (1,7)	4 (6,9)
Застойная сердечная недостаточность / Congestive heart failure	9 (15,5)	6 (10,4)	15 (25,9)
Острый панкреатит / Acute pancreatitis	2 (3,4)	–	2 (3,4)
Обструкция мочевого пузыря / непроходимость мочеточника // Bladder/ureteral obstruction	3 (5,2)	1 (1,7)	4 (6,9)
Всего / Total	38 (65,5)	20 (34,5)	58 (100)

ИП	Плоскость	TR, мс	TE, мс	ST, мм	N	FOV, см	MTX	Длитель ность, мин:с
T2 Heavy (FASE)	Корональная	15000	150	6	45	43x38	256x256	0:30
T2 Heavy (FASE)	Аксиальная	15000	60	6	34	34x41	192x256	0:45
T2 (BH)	Аксиальная	2200	90	6	45	34x41	192x320	0:55
T2 FS(BH)	Аксиальная	2400	102	6	45	34x41	192x304	1:00
T1 in/out	Аксиальная	130	2,4/ 4,8	6	27	36x41	192x256	0:52
3D ASL TI 1800	Аксиальная	6,2	2,4	8	13	25x25	64x64	5:15
3D ASL TI 2600	Аксиальная	6,2	2,4	8	13	25x25	64x64	0,52
ДВИ b=1000	Аксиальная	10560	100	6	45	34x41	128x112	5:26

a

b

Рис. 1. Техника проведения магнитно-резонансной томографии почек для пациентов с острым повреждением почек:

a – выбор импульсных последовательностей на рабочей станции; b – усовершенствованный протокол с включением диффузионно-взвешенных изображений (ДВИ) и перфузии почек с маркированием артериальных спинов (arterial spin labeling, ASL)

Fig. 1. Technique for conducting renal magnetic resonance imaging for patients with acute kidney injury:

a – selection of pulse sequences on the workstation; b – improved protocol with the inclusion of diffusion-weighted images (DWI) and arterial spin labeling (ASL) perfusion

рующей) и механизмов, их обеспечивающих (филтрация, реабсорбция и секреция). Это специфический метод МРТ, который оценивает движение, главным образом, протонов воды в ткани, а ИКД является наиболее часто используемой мерой ДВИ и дает полезную информацию о воспалении, перфузии и локальном расщеплении клеток. Наше исследование предусматривало оценку не только серовещного картирования ДВИ, но и цветного. Особенность почечного кровотока, перфузионное давление, баланс тонуса афферентных и эфферентных артериол клубочка послужили для нас критериями диагностического поиска в оценке возможностей ASL-перфузии почек для пациентов с ОПП.

Обработку и статистический анализ данных проводили в программах Excel 2019 (Microsoft, США) и Statistica 6.0 (StatSoft Inc., США). Описательная статистика приведена в тексте в виде среднего значения со стандартным отклонением ($M \pm SD$). Достоверность различий изучаемых параметров подтверждали с помощью критерия χ^2 Пирсона или точного критерия Фишера. Для группового сравнения применяли тест Манна-Уитни. Корреляционный анализ выполняли с использованием вычисления рангового коэффициента корреляции Спирмена. В качестве вероятности ошибки применяли величину $p=0,05$.

Результаты / Results

Предварительно проводили анализ основных УЗИ-признаков, которые служили критериями

оценки изменений почек: размеры, толщина коры и паренхимы, экзогенность, наличие кист (табл. 2).

Таким образом, в группе пациентов с ОПП при каждом этиологическом факторе мы сталкивались более чем в 50% случаев с нормальными УЗИ-признаками, что не позволяло достоверно судить об ОПП. Особенностью пациентов в нашем исследовании также являлось то, что отсутствовала возможность полноценного сбора анамнеза с целью понимания причинного фактора развития патологии почек (в 40% случаев пациенты поступали с нарушенным сознанием различной степени выраженности). Исходя из патогенетических особенностей кровоснабжения почечного русла, клиническая симптоматика превалирует над возможным обнаружением изменений по данным инструментальных методов исследования, в частности УЗИ. С целью оценки возможностей ДВИ и ASL-перфузии проведен анализ данных в сопоставлении с причинным фактором ОПП (табл. 3).

Статистический анализ показал, что результаты имели пороги отсечения, позволяющие прогнозировать причину ОПП, но требуется комплексный анализ количественного критерия ASL-перфузии почек, качественного и количественного критериев ДВИ ($r=0,947$). Показатели ASL-перфузии при всех этиологических причинах в сравнении с нормой были статистически значимы, отмечена высокая корреляционная связь ($r=0,995$). На рисунке 2 представлены результаты МРТ почек здорового добровольца в сравнении с показателями МРТ пациента с ОПП.

Таблица 2

Основные ультразвуковые признаки при остром повреждении почек (ОПП), n (%)

Table 2

Main ultrasound signs of acute kidney injury (AKI), n (%)

Клиническая причина ОПП / AKI clinical cause	Размеры / Size		Толщина коры и/или паренхимы // Thickness of renal cortex and/or parenchyma		Эхогенность / Echogenicity		Кисты / Cysts	
	Норма	↑	Норма	↓	Норма	↑	Нет	Да
Острое нарушение моз- гового кровообращения / Acute stroke	26 (86,7)	4 (13,0)	20 (66,7)	10 (33,3)	17 (56,7)	13 (43,3)	28 (93,3)	2 (6,7)
Кардиогенный шок / Cardiogenic shock	18 (90,0)	2 (10,0)	19 (95,0)	1 (5,0)	17 (85,0)	3 (15,0)	20 (100,0)	–
Синдром быстро прогрессирующего гломерулонефрита / Rapidly progressive glomerulonephritis	7 (87,5)	1 (12,5)	7 (87,5)	1 (12,5)	5 (62,5)	3 (37,5)	7 (87,5)	1 (12,5)
Застойная сердечная недостаточность / Congestive heart failure	–	3 (100)	–	3 (100,0)	–	3 (100,0)	2 (66,7)	1 (33,3)
Острый панкреатит / Acute pancreatitis	1 (33,3)	2 (66,7)	1 (33,3)	2 (66,7)	–	3 (100,0)	3 (100,0)	–

Таблица 3

Качественные и количественные критерии исследуемых методов в зависимости от этиологии острого повреждения почек

Table 3

Qualitative and quantitative criteria of the studied methods depending on acute kidney injury etiology

Клиническая причина ОПП / AKI clinical cause	Метод / Method		
	ДВИ / DWI		АСЛ-перфузия, мл/100 г/мин // ASL perfusion, ml/100 g/min
	Ограничение диффузии / Diffusion limitation	ИКД, $\times 10^{-3}$ мм ² /с // ADC, $\times 10^{-3}$ мм ² /с	
Острое нарушение мозгового кровообращения* / Acute stroke*	Нет / No	1,8–2,1	100–115
Кардиогенный шок* / Cardiogenic shock*	Нет / No	1,8–2,1	100–115
Синдром быстро прогрессирующего гломерулонефрита** / Rapidly progressive glomerulonephritis**	Есть / Yes	<1,79	100–115
Застойная сердечная недостаточность* / Congestive heart failure*	Нет / No	1,8–2,1	100–115
Острый панкреатит* / Acute pancreatitis*	Нет / No	1,8–2,1	100–115
Обструкция мочевого пузыря/непроходимость мочеточника*** // Bladder/ureteral obstruction***	Есть / Yes	<1,79	120–249
Группа контроля / Control group	Нет / No	1,8–2,1	>470

Примечание. ОПП – острое повреждение почек; ДВИ – диффузионно-взвешенное изображение; ИКД – измеряемый коэффициент диффузии; ASL (arterial spin labeling) – маркирование артериальных спинов. * Преренальная причина. ** Ренальная причина. *** Постренальная причина.

Note. AKI – acute kidney injury; DWI – diffusion-weighted image; ADC – apparent diffusion coefficient; ASL – arterial spin labeling. * Prerenal cause. ** Renal cause. *** Postrenal cause.

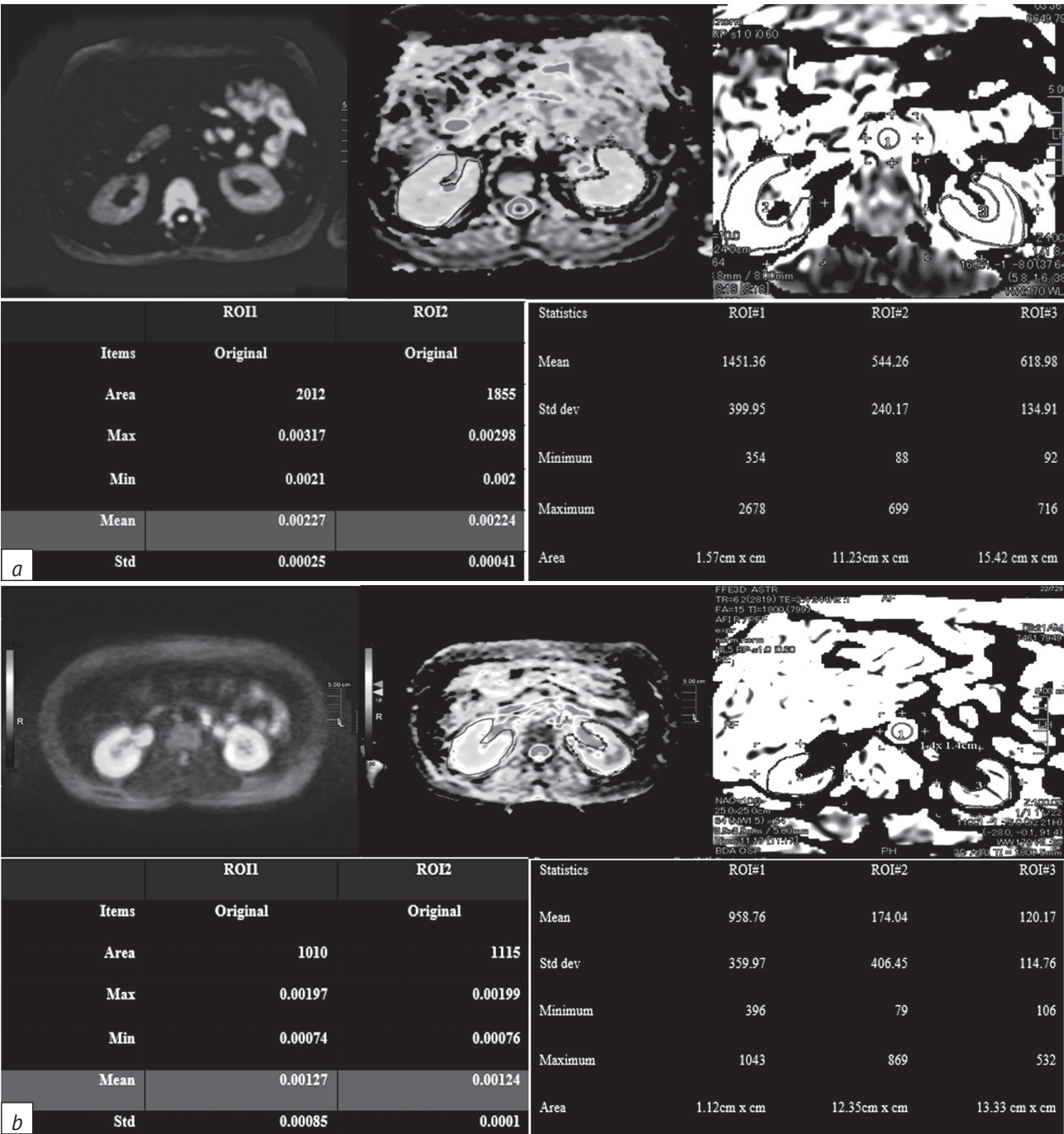


Рис. 2. Диффузионно-взвешенные изображения (ДВИ) и результаты перфузии с маркированием артериальных спинов (arterial spin labeling, ASL):
a – вариант нормы (пациент А., 50 лет), отсутствуют признаки острого повреждения почек (ОПП): качественно на ДВИ признаков ограничения диффузии не выявлено, количественно измеряемый коэффициент диффузии (ИКД, среднее значение) – правая почка (ROI1) $2,27 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$, левая почка (ROI2) $2,242,24 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$, ASL-перфузия (среднее значение) – правая почка (ROI2) 544,26 мл/100 г/мин, левая почка (ROI3) 618,98 мл/100 г/мин; b – ОПП (пациентка Е., 42 года): качественно на ДВИ ограничение диффузии, количественно ИКД (среднее значение) – правая почка (ROI1) $1,272,24 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$, левая почка (ROI2) $1,242,24 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$, ASL-перфузия (среднее значение) – правая почка (ROI2) 174,04 мл/100 г/мин, левая почка (ROI3) 120,17 мл/100 г/мин, имеет место пострениальная причина

Fig. 2. Diffusion-weighted images (DWI) and results of renal arterial spin labeling (ASL) perfusion:
a – normal variant (patient A., 50 years old), no signs of acute kidney injury (AKI): qualitatively, DWI revealed no signs of diffusion limitation, quantitatively apparent diffusion coefficient (ADC, mean) – right kidney (ROI1) $2.27 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$, left kidney (ROI2) $2.24 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$, ASL perfusion (mean) – right kidney (ROI2) 544.26 ml/100 g/min, left kidney (ROI3) 618.98 ml/100 g/min; b – AKI (patient E., 42 years old): qualitatively DWI shows diffusion limitation, quantitatively ICD (mean) – right kidney (ROI1) $1.27 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$, left kidney (ROI2) $1.24 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$, ASL perfusion (mean) – right kidney (ROI2) 174.04 ml/100 g/min, left kidney (ROI3) 120.17 ml/100 g/min; there is a postrenal cause

Дополнительное определение причины ОПП позволяет клиницисту разработать индивидуальную тактику лечения, что особенно актуально для пациентов, у которых показатели СКФ не отражают изменений в мочевыделительной системе. Определение причинного фактора ОПП важно для последующей тактики ведения больного. Так, при прerenальной причине необходимо активное введение плазмозамещающих растворов, при ренальной парентеральное введение жидкости требует предельной осторожности. Также обращает на себя внимание тот факт, что увеличение показателей ASL-перфузии почек положительно сказывалось на клинко-лабораторной картине у пациентов с ОПП ($r=0,903$).

Обсуждение / Discussion

Нами представлен способ комплексной оценки, который позволяет установить диагноз ОПП до манифестации в лабораторных исследованиях. Учитывая, что ДВИ показывают наличие ограничения диффузии как патологический маркер, в совокупности с количественным показателем ИКД они применимы для диагностики повреждения почек. Дополнительное использование ASL-перфузии дает возможность оценивать динамику процесса. Благодаря совместному применению ДВИ и ASL-перфузии можно выявить причинный фактор патологии.

Если рассматривать процесс на примере прerenального ОПП, то вначале на фоне дефицита объема циркулирующей крови происходит снижение перфузии почки (которое при МРТ-исследовании отражается в виде снижения ASL-перфузии), выражающееся в уменьшении СКФ и эффективного почечного кровотока, что клинически проявляется темпом диуреза менее 0,5 мл/кг/ч. Происходящая одновременно активация ренин-ангиотензин-альдостероновой системы приводит к активации реабсорбции натрия первичной мочи и воды. На задержку жидкости в нефронах почки указывают изменение показателя ИКД и ограничение диффузии (поскольку ДВИ отражают диффузию молекул воды во внеклеточном пространстве, которая при патологических процессах нарушается) [10].

Ранняя оценка ОПП, несомненно, важна, поскольку при своевременной диагностике и грамотном лечении возможно частичное или полное восстановление почечной функции с сохранением работоспособности и качества жизни пациента.

Заключение / Conclusion

Особенностью совместного применения ДВИ и ASL-перфузии почек при ОПП является комплексная оценка качественного и количественного критериев по данным ДВИ и количественного критерия по данным ASL-перфузии. Результаты такого исследования позволяют прогнозировать причину ОПП.

Литература

1. Khwaja A. KDIGO clinical practice guidelines for acute kidney injury. *Nephron Clin Pract.* 2012; 120(4): 179–84. <https://doi.org/10.1159/000339789>.
2. KDIGO clinical practice guideline for acute kidney injury. *Kidney Int Suppl.* 2012; 2: 1–138. <https://doi.org/10.1038/kisup.2012.3>.
4. Смирнов А.В., Каюков И.Г., Добронравов В.А., Румянцев А.Ш. Острое повреждение почек: концептуальные проблемы. *Нефрология.* 2014; 18(2): 8–24.
3. Остерманн М. Острое повреждение почек у пациентов в критическом состоянии как общемировая проблема. *Вестник анестезиологии и реаниматологии.* 2019; 16(2): 83–95. <https://doi.org/10.21292/2078-5658-2019-16-2-83-95>.
5. Морозов Ю.А., Марченко Т.В. Патолофизиологические аспекты острого почечного повреждения. *Почки.* 2012; 2: 72–7.
6. Ricci Z, Cruz D, Ronco C. The RIFLE classification for acute kidney injury definition. *Kidney Int.* 2008; 73(5): 538–46. <https://doi.org/10.1038/sj.ki.5002743>.
7. Cruz DN, Bagshaw SM, Ronco C, Ricci Z. Acute kidney injury: classification and staging. *Contrib Nephrol.* 2010; 164: 24–32. <https://doi.org/10.1159/000313717>.
8. Franklin SL, Bones IK, Hartevelde AA, et al. Multi-organ comparison of flow-based arterial spin labeling techniques: spatially non-selective labeling for cerebral and renal perfusion imaging. *Magn Reson Med.* 2021; 85(5): 2580–94. <https://doi.org/10.1002/mrm.28603>.
9. Труфанов Г.Е., Фокин В.А., Асатурян Е.Г. и др. Методика артериального спинового маркирования: клиническое применение. *Russian Electronic Journal of Radiology.* 2019; 9(4): 129–47. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-4-129-147>.
10. De Perrot T, Sadjo Zoua C, Glessgen CG, et al. Diffusion-weighted MRI in the genitourinary system. *J Clin Med.* 2022; 11(7): 1921. <https://doi.org/10.3390/jcm11071921>.
11. Sugiyama K, Inoue T, Kozawa E, et al. Reduced oxygenation but not fibrosis defined by functional magnetic resonance imaging predicts the long-term progression of chronic kidney disease. *Nephrol Dial Transplant.* 2020; 35(6): 964–70. <https://doi.org/10.1093/ndt/gfy324>.

References

1. Khwaja A. KDIGO clinical practice guidelines for acute kidney injury. *Nephron Clin Pract.* 2012; 120(4): 179–84. <https://doi.org/10.1159/000339789>.
2. KDIGO clinical practice guideline for acute kidney injury. *Kidney Int Suppl.* 2012; 2: 1–138. <https://doi.org/10.1038/kisup.2012.3>.
4. Smirnov AV, Kayukov IG, Dobronravov VA, Rumyantsev ASH. Acute kidney injury: conceptual problems. *Nephrology*

- (Saint-Petersburg). 2014; 18(2): 8–24 (in Russ).
3. Ostermann M. Acute kidney injury during critical illness – a global challenge. *Messenger of Anesthesiology and Resuscitation*. 2019; 16(2): 83–95 (in Russ). <https://doi.org/10.21292/2078-5658-2019-16-2-83-95>.
 5. Morozov Yu.A., Marchenko T.V. Pathophysiological aspects of acute renal injury. *Pochki / Kidneys*. 2012; 2: 72–7 (in Russ).
 6. Ricci Z, Cruz D, Ronco C. The RIFLE classification for acute kidney injury definition. *Kidney Int*. 2008; 73(5): 538–46. <https://doi.org/10.1038/sj.ki.5002743>.
 7. Cruz DN, Bagshaw SM, Ronco C, Ricci Z. Acute kidney injury: classification and staging. *Contrib Nephrol*. 2010; 164: 24–32. <https://doi.org/10.1159/000313717>.
 8. Franklin SL, Bones IK, Harteveld AA, et al. Multi-organ comparison of flow-based arterial spin labeling techniques: spatially non-selective labeling for cerebral and renal perfusion imaging. *Magn Reson Med*. 2021; 85(5): 2580–94. <https://doi.org/10.1002/mrm.28603>.
 9. Trufanov GE, Fokin VA, Asaturyan EG, et al. Arterial spin labeling: clinical applications. *Russian Electronic Journal of Radiology*. 2019; 9(4): 129–47 (in Russ). <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-4-129-147>.
 10. De Perrot T, Sadjo Zoua C, Glessgen CG, et al. Diffusion-weighted MRI in the genitourinary system. *J Clin Med*. 2022; 11(7): 1921. <https://doi.org/10.3390/jcm11071921>.
 11. Sugiyama K, Inoue T, Kozawa E, et al. Reduced oxygenation but not fibrosis defined by functional magnetic resonance imaging predicts the long-term progression of chronic kidney disease. *Nephrol Dial Transplant*. 2020; 35(6): 964–70. <https://doi.org/10.1093/ndt/gfy324>.