

УДК 612.13:616-073.43

DOI: 10.34215/1609-1175-2023-1-27-34



Оценка органной перфузии и волемического статуса с помощью ультразвука

М.В. Зозуля, А.И. Ленкин

Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

Представлен обзор литературы, посвященный ультразвуковому мониторингу волемического статуса и органной перфузии у пациентов в критическом состоянии, определению чувствительности к инфузионной нагрузке с помощью доплерометрических показателей кровотока в периферических артериях. Обосновывается надежность и точность этих параметров, их соответствие показателям, полученным методами препульмональной и транспульмональной термодилуции. Рассматриваются технические аспекты ультразвукового исследования данных параметров.

Ключевые слова: волемический статус, чувствительность к инфузионной нагрузке, гипervолемия, венозный застой, ультразвук

Поступила в редакцию: 02.12.22. Получена после доработки: 08.12.22. Принята к публикации: 14.02.23

Для цитирования: Зозуля М.В., Ленкин А.И. Оценка органной перфузии и волемического статуса с помощью ультразвука. Тихоокеанский медицинский журнал. 2023;1:27–34. doi: 10.34215/1609-1175-2023-1-27-34

Для корреспонденции: Зозуля Мария Васильевна – врач – анестезиолог-реаниматолог клиник СЗГМУ им. И.И. Мечникова (191015, г. Санкт-Петербург, ул. Кирочная, д. 41); ORCID: 0000-0002-3498-4023; e-mail: ya.zqwt@yandex.ru

Evaluation of organ perfusion and intravascular volume status by ultrasound

M.V. Zozulya, A.I. Lenkin

North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint-Petersburg, Russia

This review article is devoted to ultrasound monitoring of intravascular volume status and organ perfusion in critically ill patients. In particular, approaches to determination of fluid responsiveness using Doppler-estimated blood flow in peripheral arteries are discussed. The reliability and accuracy of these parameters are substantiated by their comparison with the parameters obtained by prepulmonary and transpulmonary thermodilution methods. The technicalities of ultrasound examination of the abovementioned parameters are considered.

Keywords: intravascular volume status, fluid responsiveness, hypervolemia, venous congestion, ultrasound.

Received 2 December 2022. Revised 8 December 2022. Accepted 14 February 2023

For citation: Zozulya M.V., Lenkin A.I. Evaluation of organ perfusion and intravascular volume status by ultrasound. *Pacific Medical Journal*. 2023;1:27–34. doi: 10.34215/1609-1175-2023-1-27-34

Corresponding author: Maria V. Zozulya, anesthesiologist of the clinics of the North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov (41 Kirochnaya str., St. Petersburg, 191015, Russia); ORCID: 0000-0002-3498-4023; e-mail: ya.zqwt@yandex.ru

У пациентов в критическом состоянии с артериальной гипотензией и шоком первой линией терапии является инфузионная терапия, цель которой – восполнение дефицита объема циркулирующей крови и увеличение ударного объема левого желудочка. Однако только половина гемодинамически нестабильных пациентов отвечает на инфузионную терапию значимым (более чем на 10–15%) увеличением сердечного выброса (СВ) [1]. Этот и другие функциональные параметры (ударный объем, общее периферическое сосудистое сопротивление, индекс внесосудистой воды легких и др.) определяются при проведении препульмональной и транспульмональной термодилуции с помощью катетера Сван-Ганца или системы PiCCO соответственно. Их проведение не всегда возможно технически и, кроме того, неоправданно повышает инвазивность и стоимость лечения.

В последнее время инвазивный мониторинг часто заменяется неинвазивным (биоимпеданс/биореактивность, USCOM – ultrasonic cardiac output monitors)

или малоинвазивным (анализ пульсовой волны), хотя данные об их объективности и достоверности неоднозначны [2]. Ультразвуковые исследования применяются в анестезиологической практике и интенсивной терапии практически повсеместно. Для оценки волемического статуса чаще всего оценивается диаметр нижней полой вены и его изменения при дыхании, хотя последние данные говорят о ненадежности этого показателя [3]. Трансторакальная фокусная эхокардиография является методом выбора для оценки сократимости миокарда, функции клапанов сердца и степени наполнения его камер, однако часто исследователю трудно визуализировать все камеры сердца и провести соответствующие измерения. У 40% пациентов, находящихся в отделении реанимации, невозможно обнаружить удовлетворительное акустическое окно, а у 69% невозможно рассчитать фракцию выброса левого желудочка [4, 5]. Более того, эхокардиография требует от исследователя определенной теоретической

подготовки и мануальных навыков. В связи с этим продолжают поиски более простых и чувствительных ультразвуковых параметров для оценки волемического статуса.

У пациентов в критическом состоянии определенным интересом представляет оценка регионарной перфузии. Перфузия отдельных органов более объективно отражает состояние системы кровообращения, чем СВ. Нарушения периферического кровообращения выявляются раньше, чем снижение артериального давления (АД) или СВ. После нормализации этих показателей восстановление адекватного кровообращения в органах и тканях происходит медленно. Интенсивность движения крови через магистральные, поверхностно расположенные артерии (плечевая, общая сонная) коррелирует с кровотоком через выводной тракт левого желудочка [6, 7]. При этом доплерометрическая оценка спланхического артериального и венозного кровотока служит критерием адекватности органной перфузии [8].

К уникальным свойствам ультразвукового исследования можно отнести способность выявлять не только гиповолемию, но и гиперволемию, которая нередко встречается у реанимационных пациентов. Патологическая перфузия через воротную вену, внутрипочечные вены и печеночные вены является индикатором перегрузки жидкостью. Выявление таких паттернов кровотока может помочь врачу контролировать дегидратационную терапию, которая включает ограничение объема инфузии и назначение диуретиков, а в отдельных случаях и проведение заместительной почечной терапии.

Почечный и селезеночный резистивный индекс (renal/splenic doppler resistive index, RDRI, SDRI)

Резистивный индекс отображает сопротивление артерий потоку крови. Внутрипочечные междольевые и сегментарные артерии имеют низкое сосудистое сопротивление, кровоток в них происходит постоянно в систолу и диастолу. Это обусловлено высоким минутным почечным кровотоком (до 20% от СВ), поскольку почки являются ключевым органом, регулирующим гомеостаз. Резистивный индекс измеряется по формуле:

$$(PSV - EDV)/PSV,$$

где PSV – пиковая систолическая скорость, EDV – конечно-диастолическая скорость.

При развитии гиповолемии, например при острой кровопотере, происходит централизация кровообращения за счет вазоконстрикции, в том числе почечных артерий. На значение резистивного индекса оказывает влияние в основном комплексное воздействие системной гемодинамики, жесткости аорты и податливости почечных артерий, а также почечной микроциркуляции [9]. У пациентов в критическом состоянии дополнительными факторами, которые будут влиять на RDRI, являются искусственная вентиляция легких с положительным давлением, использование вазопрессоров и повышенное внутрибрюшное давление.

У многих пациентов, находящихся в критическом состоянии, развивается острое почечное повреждение (ОПП). Это осложнение существенно увеличивает риск неблагоприятного исхода, в связи с этим ранняя диагностика ОПП является одной из приоритетных и до сих пор нерешенных клинических проблем [10]. Традиционно измеряемые показатели (сывороточный креатинин, мочевины, скорость клубочковой фильтрации, протеинурия) достигают критических значений, когда выделительная функция почек уже значительно нарушена. Биомаркеры острого почечного повреждения позволяют прогнозировать развитие ОПП еще до повышения креатинина сыворотки крови (за 12–24 часа) [11]. Их широкое использование в клинической практике ограничено, а значение в улучшении выживаемости пациентов окончательно не доказано [12]. Ведущим механизмом развития ОПП у пациентов в критическом состоянии считается гипоперфузия, и потому оценка перфузии почек может помочь в ранней диагностике и мониторинге эффективности проводимого лечения.

Из методов оценки перфузии почек наиболее доступным и приемлемым является ультразвуковое исследование. Допплерометрические показатели почечного кровотока могут быть использованы для прогнозирования развития и обратимости ОПП у пациентов в критическом состоянии, что нашло подтверждение в нескольких обсервационных исследованиях [13–15]. К примеру, S. Rozemeijer и соавт. [13] выявили, что у пациентов с шоком любой этиологии значения RDRI были достоверно выше, чем у пациентов без шока, а значения этого показателя коррелировали с частотой развития ОПП (0,751 [0,692–0,788] против 0,654 [0,610–0,686], $p < 0,001$). Данный показатель коррелировал со значением среднего АД и потребностью в вазопрессорной поддержке (более высокий RDRI у пациентов с лактатом более 3 ммоль/л и вазопрессорной поддержкой, чем без нее). Авторы пришли к выводу, что значения RDRI в большей степени обусловлены изменениями АД, индекса пульсового давления, применением вазопрессорной поддержки, чем влиянием СВ и параметров микроциркуляции.

Более надежным предиктором развития ОПП является комбинация высокого центрального венозного давления (ЦВД) ($\geq 9,5$ – $11,5$ мм рт. ст.) и RDRI ($\geq 0,695$), что было доказано в нескольких исследованиях [15, 16]. В то время как ЦВД традиционно считается маркером преднагрузки правого желудочка, оно также влияет на венозный кровоток в органах брюшной полости, в особенности в почках, так как они находятся в замкнутом пространстве, ограниченном капсулой. Соответственно, высокие значения ЦВД снижают почечное перфузионное давление (среднее АД минус ЦВД), препятствуя оттоку крови из почек. Высокое ЦВД повышает риск развития ОПП у пациентов с сепсисом и септическим шоком [15, 16], а также у пациентов с острой сердечной недостаточностью вне зависимости от значений сердечного индекса [17].

Методологически правильно измерять почечный резистивный индекс на уровне сегментарных или междолевых артерий в разных участках почек с определением среднего значения. Из всех доплерометрических показателей RDRI наиболее сложен технически. Пациенту необходимо задержать дыхание, чтобы изображение на экране аппарата стало неподвижным, а перемещение крови по междолевой артерии и вене фиксируется импульсно-волновой доплерометрией. Пациенты в критическом состоянии не всегда могут выполнить задержку дыхания, иногда контакт с ними затруднен, что еще больше осложняет проведение исследования.

Кровоток по селезеночной артерии составляет до 10% от СВ. При резком снижении объема циркулирующей крови при кровопотере в системную циркуляцию одномоментно может быть перемещен значимый объем крови из селезенки [18]. Отмечается повышение тонуса селезеночной артерии на фоне выраженной симпатической стимуляции, что проявляется увеличением значений селезеночного резистивного индекса (SDRI), в норме составляющего 0,6–0,65. Так, у пациентов с тяжелой сочетанной травмой, которые при поступлении в стационар не имели признаков шока, но при этом доплерометрическое исследование селезеночной артерии демонстрировало высокие значения SDRI, в последующие сутки развивался гиповолемический шок, а у пациентов с нормальными значениями SDRI состояние оставалось стабильным [19].

С. Brusasco и соавт. [20] показали, что значения SDRI меняются при проведении инфузионной терапии. В их исследование были включены кардиохирургические пациенты на искусственной вентиляции легких в раннем послеоперационном периоде. Снижение SDRI менее чем на 4% после болюсного внутривенного введения жидкости исключало восприимчивость к инфузионной нагрузке. При этом снижение значений SDRI более чем на 10% после инфузии свидетельствовало о том, что пациент восприимчив к инфузионной нагрузке [20]. В этой работе абсолютные значения SDRI между группами пациентов, восприимчивых и невосприимчивых к инфузионной нагрузке, статистически не отличались как до инфузии ($0,68 \pm 0,09$ и $0,64 \pm 0,09$; $p = 0,106$ соответственно), так и после ($0,63 \pm 0,09$ и $0,62 \pm 0,09$; $p = 0,928$ соответственно) [20]. Это свидетельствует о том, что значение SDRI важно оценивать в динамике. Лишь крайние значения (более 0,75–0,8) служат признаком гиповолемии.

Селезеночный резистивный индекс оценивается в трех локализациях (верхнем, среднем и нижнем участках селезенки) и определяется среднее значение показателя. Для расчета SDRI также не требуется коррекция доплеровского угла.

Оценка кровотока через общую сонную артерию

От 15 до 26% СВ приходится на церебральный кровоток, большая часть которого осуществляется через сонные артерии. Ультразвуковое исследование

кровотока через сонную артерию может использоваться как инструмент гемодинамического мониторинга, поскольку имеется соответствие показателей каротидного кровотока и СВ [6, 7]. Определение статических индексов и/или динамических показателей каротидной доплерометрии позволяет выявить восприимчивость к инфузионной нагрузке [21].

Скорректированное время потока (ccFT, corrected carotid flow time) рассчитывается по формуле:

$$\text{ccFT} = \text{flow time} / \sqrt{\text{cycle time}},$$

где flow time – систолическое время, определяемое на кривой импульсно-волновой доплерометрии от начала подъема скорости потока до диастолической выемки (в мс), cycle time – время сердечного цикла от зубца R до зубца R либо время между двумя пиками систолической скорости (в секундах).

Формула аналогична формуле Базетта для расчета скорректированной продолжительности интервала QT. То есть можно измерить время систолического потока в режиме импульсно-волновой доплерометрии, частоту сердечных сокращений (ЧСС) и эти показатели подставить в соответствующую формулу на медицинском электронном калькуляторе (рис. 1).

При оценке волемического статуса с помощью каротидной доплерометрии параметр ccFT рассматривается как весьма объективный показатель [22]. При этом учитываются абсолютные значения и их изменения в процентах при проведении теста с быстрой инфузионной нагрузкой или теста с подъемом нижних конечностей. Значение в 300–350 мс выступает в качестве порогового, при меньших показателях с высокой долей вероятности пациент положительно ответит на инфузионную нагрузку. Авторы одной из первых работ, посвященной оценке ccFT в качестве волюметрического показателя, установили, что у пациентов с явной гиповолемией средние значения ccFT были 299 мс, а прирост после инфузии 1100 мл кристаллоидного раствора в среднем составлял 15% [21]. Изменения абсолютных значений ΔccFT от 7 до 30 мс, а также прирост показателя на 15–25% после выполнения теста с подъемом нижних конечностей считаются пороговыми для выявления гиповолемии. Показатель ccFT не зависит от фаз дыхания (что характерно для скоростных параметров), а также менее зависим от правильности коррекции угла сканирования доплеровского луча.

Динамика изменений скорости церебрального кровотока (ΔCBF) при проведении пробной инфузионной нагрузки имеет наиболее высокую диагностическую ценность при выявлении пациентов восприимчивых к инфузионной нагрузке (респондеров) [22]. При этом пороговым считается прирост значений в пределах 9–14%. Расчет церебрального кровотока проводится по формуле:

$$\text{CBF} = \pi \times D^2/4 \times \text{VTI} \times \text{ЧСС} \text{ или } 0,875 \times D^2 \times \text{VTI} \times \text{ЧСС}.$$

Во многих ультразвуковых аппаратах объемная скорость кровотока рассчитывается автоматически,

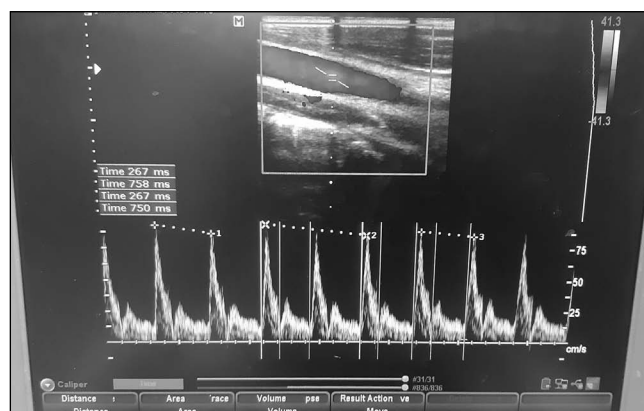


Рис. 1. Измерение доплерометрических показателей каротидного кровотока (скорректированное время систолического потока). Для расчета $ccFT$ необходимо измерить время систолического потока (Time 267 мс в данном примере), затем общее время кровотока за один сердечный цикл (Time 758 мс). Применяя формулу Базетта, получим $ccFT=307$ мс. Также отмечена респираторная вариабельность пиковой систолической скорости кровотока (ΔV_{peak}).

необходимо только вручную определить диаметр общей сонной артерии (ОСА) и получить адекватную кривую кровотока в импульсно-волновом режиме.

Каротидный кровоток имеет свои особенности. В отличие от кровотока через выводной тракт левого желудочка (ВТЛЖ), диаметр ОСА меняется на протяжении сердечного цикла [23]. Широко распространенный метод оценки волемического статуса с помощью определения VTI (интеграла скорости по времени) через ВТЛЖ основан на том, что диаметр ВТЛЖ постоянен. Изменения значений VTI отражают изменение ударного объема и волемического статуса в целом. Нормальные значения VTI ВТЛЖ находятся в диапазоне 18–22 см. В связи с меняющимся диаметром ОСА показатель VTI не может использоваться в качестве эквивалента кровотока [24]. С другой стороны, при оценке кровотока учитываются и диаметр сосуда, и VTI. Поэтому среднее значение каротидного кровотока после серии измерений (обычно достаточно трех) может с достаточной точностью отражать ударный объем. Увеличение церебрального кровотока после теста с подъемом нижних конечностей у гемодинамически нестабильных септических пациентов более значительно при гиповолемии [25]. При этом изменение индекса ударного объема, оцененного с помощью биоимпеданса, коррелирует с процентным изменением церебрального кровотока [25]. Авторы установили пограничное значение прироста церебрального кровотока в 20% для выявления пациентов, восприимчивых к инфузионной нагрузке с чувствительностью и специфичностью 94 и 86% соответственно.

Третьим показателем каротидного кровотока, который может отражать волемический статус, является респираторная вариабельность пиковой систолической скорости кровотока (ΔV_{peak}) (рис. 1). Она рассчитывается следующим образом:

$$\Delta V_{peak} = 100 \times (\text{maximum peak velocity} - \text{minimum peak velocity}) / ((\text{maximum peak velocity} + \text{minimum peak velocity}) / 2),$$

где maximum peak velocity – максимальная пиковая систолическая скорость за один дыхательный цикл, minimum peak velocity – минимальная пиковая систолическая скорость за один дыхательный цикл.

В исследовании D.H. Kim D.H. и соавт. [26] показано, что вариабельность пиковой систолической скорости кровотока обычно значительно выше перед инфузионной нагрузкой у респондеров, чем у нереспондеров: оптимальным пограничным значением для ΔV_{peak} было 9,1%, с чувствительностью 72,7% и специфичностью 87,1%. В эту работу были включены гемодинамически стабильные пациенты на спонтанном дыхании перед плановыми нейрохирургическими вмешательствами. У пациентов с нестабильной гемодинамикой, находящихся на искусственной вентиляции легких, вариабельность пиковой систолической скорости кровотока в ОСА выше из-за более выраженных кардиореспираторных взаимодействий. Это приводит к вариабельности ударного объема левого желудочка за время одного дыхательного цикла. При гиповолемии эта разница более выражена, что отображается на показателе ΔV_{peak} .

М.А. Ibarra-Estrada и соавт. [4] оценивали чувствительность показателя вариабельности пиковой систолической скорости кровотока, определенной в ОСА как предиктора восприимчивости к инфузионной нагрузке (7 мл/кг изотонического раствора в течение 30 минут) у септических пациентов, находящихся на искусственной вентиляции легких. При оценке других предикторов ответа на волемическую нагрузку (ЦВД, абсолютные значения и изменения диаметра нижней полой вены, вариации ударного объема и пульсового давления, индекс глобального конечно-диастолического объема при проведении теста с подъемом нижних конечностей) ΔV_{peak} , определенная в ОСА, имела наибольшую чувствительность и специфичность (86 и 86% соответственно), а также положительную и отрицательную прогностическую значимость (86 и 85% соответственно) при пороговом значении 14% [4]. У остальных показателей чувствительность и специфичность не превышали 70%.

Резистивный индекс кровотока в лучевой артерии в месте анатомической табакерки (Snuffbox resistive index, SBRI)

Общее периферическое сосудистое сопротивление (ОПСС) рассчитывается по формуле:

$$\text{ОПСС} (\text{дин} \times \text{с} \times \text{см}^{-5} \times \text{м}^2) = 80 \times (\text{АДср} - \text{ЦВД}) / \text{СВ}$$

Для расчета ОПСС необходимо вычислить сердечный выброс и определить (ЦВД), что требует инвазивного мониторинга. Поэтому поиск неинвазивного, надежного и быстрого способа расчета ОПСС видится одним из приоритетных направлений в гемодинамическом мониторинге.

В 2005 году К. Ван и К. Кочи [27] впервые предложили вычислять резистивный индекс (РИ) в лучевой артерии в месте анатомической табакерки с целью оценки ОПСС. Они установили прочную взаимосвязь между этими двумя показателями у пациентов после кардиохирургических операций ($r = 0,582$, $p < 0,0001$). Авторы сравнивали ОПСС с РИ в плечевой артерии в локтевом сгибе и в лучевой артерии в области запястья: РИ и ОПСС не коррелировали между собой (плечевая артерия: $r = 0,074$, $p = 0,12$; лучевая артерия: $r = 0,081$, $p = 0,09$). Это объясняется тем, что в месте анатомической табакерки ход кровотока в лучевой артерии и ультразвукового луча практически совпадают: требуемый доплеровский угол составлял всего $11,5 \pm 10,8^\circ$ против более 60° в двух других местах измерения (рис. 2). Значение угла критично для измерения РИ: при показателях более 60° ошибка в измерении скоростей составляет более 30%, что обусловлено резким возрастанием значения косинуса. Авторы не предложили диапазон нормальных значений РИ, который соответствовал бы нормальным значениям ОПСС. Взамен этого они отметили, что выявление на кривой кровотока в импульсно-волновом режиме диастолического реверса потока с высокой вероятностью говорит о значении индекса ОПСС более 2000 $\text{дин} \times \text{с} \times \text{см}^{-5} \times \text{м}^2$ (норма 1970–2390 $\text{дин} \times \text{с} \times \text{см}^{-5} \times \text{м}^2$), что свидетельствует о вазоконстрикции [27].

В другом исследовании также оценивали взаимосвязь между ОПСС, измеренным методом транспульмональной термодилуции, и РИ, но у пациентов с септическим шоком, в результате была выявлена сильная корреляция между этими показателями ($r = 0,87$, $p < 0,001$) [28]. При этом РИ 0,97 соответствовал нижней границе нормального индекса ОПСС (1700 $\text{дин} \times \text{с} \times \text{см}^{-5} \times \text{м}^2$), а РИ 1,1 – верхней границе нормального индекса ОПСС (2400 $\text{дин} \times \text{с} \times \text{см}^{-5} \times \text{м}^2$). Чем глубже проводится измерение РИ в лучевой артерии, тем меньший угол коррекции требуется, тем выше корреляция между РИ и истинным ОПСС [27]. Идеально РИ измерять на глубине 1,5 см, хотя технически это более сложно.

Помимо приемлемого отображения ОПСС резистивный индекс может использоваться в качестве предиктора клиренса лактата в первые часы развития септического шока. При адекватной инфузионной терапии значение РИ более 1,09 с чувствительностью 64,3% и специфичностью 81,2% предсказывает 6-часовой клиренс лактата менее 20%, что ассоциировано с худшей выживаемостью [29]. Примечательно, что в представленном исследовании сердечный индекс, значения ОПСС и лабораторные показатели (сатурация смешанной венозной крови, артериовенозная разница по CO_2) не обладали способностью предсказывать 6-часовой клиренс лактата. При этом значения РИ были достоверно ниже ($0,88 \pm 0,14$ против $1,15 \pm 0,09$), а периферический перфузионный индекс был достоверно выше ($2,50 \pm 1,66$ против $0,75 \pm 0,69$) в подгруппе пациентов с 6-часовым клиренсом лактата более

20% [29]. Поэтому РИ в большей степени отображает периферическую тканевую перфузию, но не глобальный гемодинамический статус. Авторы ссылаются на австралийское обсервационное исследование ARISE (Australian Resuscitation in Sepsis Evaluation), в котором было показано, что септические пациенты с изолированной гиперлактатемией имели более высокие показатели 90-дневной летальности и меньшие шансы перевода из отделения реанимации и интенсивной терапии (ОРИТ), чем септические пациенты с изолированной гипотензией [30]. Этот факт говорит о том, что недостаточно поддерживать только гемодинамические параметры, важно также обеспечить адекватную тканевую перфузию у пациентов с септическим шоком. При этом определение резистивных индексов и анализ доплерометрической кривой в спланхических (селезенки, почек) и периферических артериях (лучевая артерия в области анатомической табакерки) являются надежными, воспроизводимыми и доступными методами оценки тканевой перфузии.

Паттерн кровотока во внутривороточных венах и пульсационный индекс в воротной вене в оценке гиперволемии

Несмотря на то что выявление пациентов с гиповолемией, нуждающихся в дополнительной инфузии, является одним из основных компонентов целенаправленной терапии, у реанимационных пациентов часто встречается гиперволемия и гипергидратация [31]. В первую очередь это касается септических пациентов, массивная инфузия кристаллоидных растворов, у которых не прекращается в первые часы интенсивной терапии, а в некоторых случаях продолжается и в последующие дни [31]. Помимо сепсиса, высокая частота ятрогенной гипергидратации встречается у пациентов с гиповолемическим шоком (массивная кровопотеря, ожоговая болезнь), а также у пациентов, находящихся в ОРИТ длительное время. Клинические проявления гипергидратации (периферические отеки, отек легких, накопление жидкости в полостях тела – асцит, гидроторакс) свидетельствуют о крайне тяжелой степени гипергидратации. При этом даже незначительный

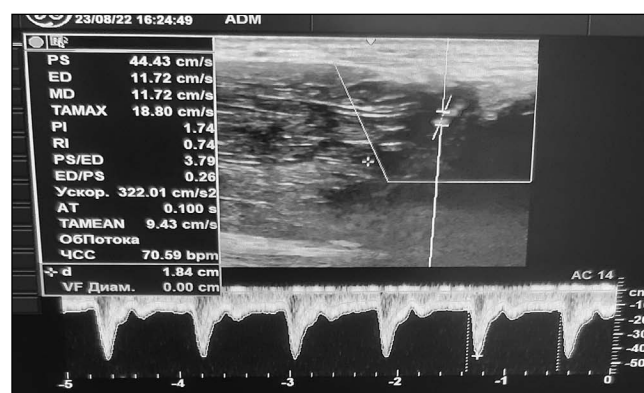


Рис. 2. Измерение резистивного индекса в лучевой артерии в области анатомической табакерки (рассчитанное автоматически значение SBRI отмечено овалом). Угол коррекции доплерометрического луча 14° (angle correction, AC).

(5–10%) прирост массы тела в первые двое суток пребывания в ОРИТ (так называемый fluid overload) и положительный кумулятивный гидробаланс являются независимым фактором риска развития множественной органной дисфункции и неблагоприятного исхода [32]. Перегрузка жидкостью приводит к нарушению венозного оттока от органов и тканей, что проявляется нарушением их функции. В первую очередь это состояние касается головного мозга, печени и почек.

В норме венозный кровоток через внутривенные вены (чаще всего исследуют междольковые вены) низкоскоростной и постоянный, то есть отток крови происходит как в систолу, так и в диастолу. При ухудшении венозного оттока (высокое давление в правом предсердии, перитубулярный интерстициальный отек или венозный застой на фоне гиперволемии) паттерн кровотока меняется: сначала он становится бифазным в систолу и диастолу отдельными потоками, затем – монофазным только в диастолу (рис. 3) [33].

При визуализации почки в продольном сканировании в коронарной или сагиттальной плоскости при импульсно-волновой доплерографии венозный кровоток визуализируется ниже базовой линии, а артериальный кровоток – выше базовой линии. Как отмечалось ранее, междольковые почечные сосуды имеют небольшой диаметр, поэтому одновременно можно визуализировать внутривенную артерию и вену, что помогает в идентификации периодов сердечного цикла (систола и диастолы).

Главной технической сложностью при импульсно-волновой доплерографии почечных вен является неизбежное движение почек при дыхании и исчезновение кривой кровотока на дисплее УЗИ-аппарата. Для улучшения визуализации при возможности необходимо просить пациента задержать дыхание, хотя это не всегда возможно у пациентов в критическом состоянии.

При прогрессировании венозного застоя характерно меняется венозный кровоток в воротной вене, который в норме постоянен и имеет скорость около 20–40 см/с. Кривая кровотока в воротной вене

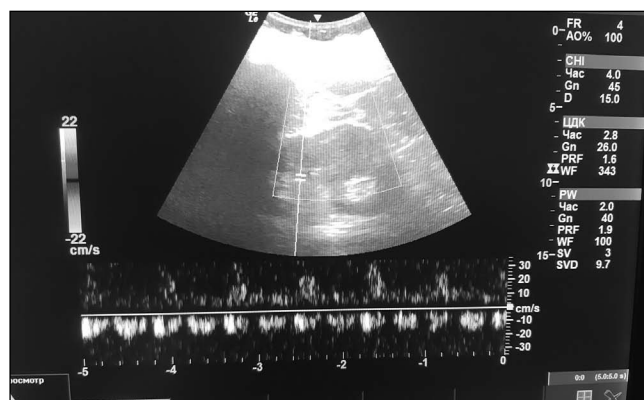


Рис. 3. Кровоток через внутривенные сосуды в импульсно-волновом режиме. Выше базовой линии отображается кровоток через междольковую почечную артерию, ниже – междольковую почечную вену. Кровоток через вену бифазный.

при импульсно-волновой доплерографии располагается выше базовой линии, имеет маловыраженный волнистый характер (пульсационный индекс меньше 30%), а изменения скорости кровотока обусловлены сокращением правого предсердия [34]. При увеличении давления в правом предсердии растет давление в системе воротной вены, кровоток становится пульсирующим. При выраженном венозном застое систолический компонент реверсирует, и кровоток меняет направление. Технически вывести кривую кровотока в воротной вене достаточно просто, подвижность печени при дыхании менее выражена, чем у почек, диаметр воротной вены довольно велик (13–15 мм), поэтому при импульсно-волновой доплерографии она «не теряется из виду».

Показатели кровотока в почках и воротной вене могут быть использованы как надежные, легко воспроизводимые, прикроватные параметры оценки венозного застоя. К примеру, W. Beaubien-Souligny и соавт. [35] проводили оценку венозного кровотока в почках и воротной вене у 145 пациентов после кардиохирургических операций, выполненных в условиях искусственного кровообращения. Пульсационный индекс в воротной вене более 50%, а также изменения характера венозного кровотока во внутривенных венах (бифазный или монофазный тип кровотока) ассоциировались с увеличением риска развития ОПП. Прикроватное доплерографическое исследование является одним из немногих доступных методов оценки венозного застоя. Выявление патологических паттернов кровотока позволяет проводить целенаправленную диуретическую терапию, тем самым снижая риски развития тяжелого ОПП. У пациентов с декомпенсированной сердечной недостаточностью оценка кровотока через нижнюю полую вену (НПВ) (степень коллабироваия) и воротную вену (пульсационный индекс) позволяет безопасно и эффективно проводить диуретическую или заместительную почечную терапию [36]. В серии наблюдений 12 пациентов с лево- или правожелудочковой СН пульсационный индекс через воротную вену снижался с $81,75 \pm 13\%$ при поступлении до $17,43 \pm 2,2\%$ после проведения комплекса диуретической терапии и достижения отрицательного кумулятивного гидробаланса ($-8,2 \pm 4$ л) и клинического улучшения. При этом у пациентов с левожелудочковой недостаточностью отмечалось улучшение как в показателях кровотока через нижнюю полую вену, так и через воротную вену, а при правожелудочковой недостаточности объективным показателем был только паттерн кровотока через воротную вену. Кривая кровотока через НПВ в виде pletora, характеризующаяся отсутствием изменений в диаметре в зависимости от фазы дыхания и постоянством диаметра более 2 см, сохранялась у пациентов с правожелудочковой СН даже после успешной терапии диуретиками и клинического улучшения [36]. Высокое давление в правых камерах сердца у пациентов с легочной гипертензией или констриктивным перикардитом препятствует

нормальному кровотоку в системе НПВ, тем самым даже в состоянии эу- или гиповолемии у пациентов с правожелудочковой недостаточностью НПВ будет расширена (более 2 см), а ее диаметр не будет меняться. При этом кровоток в воротной вене будет иметь нормальный характер. Это обусловлено анатомическими особенностями: воротная вена ограничена от печеночных вен и НПВ системой внутripеченочных капилляров. Это делает исследование воротной вены более надежным с точки зрения дифференциальной диагностики гипervолемии, чем оценка состояния нижней полой вены. В других исследованиях была выявлена взаимосвязь между повышенным пульсационным индексом в воротной вене и частотой возникновения делирия и когнитивными расстройствами после кардиохирургических вмешательств [37]. Церебральная десатурация (как в операционной, так и в отделении интенсивной терапии), высокие значения предсердного натрийуретического пептида (NT-pro-BNP) были ассоциированы с развитием делирия и когнитивной дисфункцией в послеоперационном периоде. У пациентов с такими осложнениями при ультразвуковом исследовании значения пульсационного индекса в воротной вене были значительно выше, чем у пациентов с неосложненным течением послеоперационного периода [37]. Это косвенно свидетельствует о том, что причиной неврологических осложнений могла быть гипергидратация. Головной мозг, так же как и почки, заключен в ограниченном пространстве. Венозный застой вызывал повышение внутричерепного давления и отек головного мозга, что могло повлечь за собой развитие когнитивных расстройств.

Таким образом, оценка паттернов кровотока в воротной и внутripочечных венах демонстрирует высокую клиническую значимость для своевременного выявления гипергидратации и назначения дегидратационной терапии.

Заключение

Допплерометрическое исследование кровотока в спланхических и магистральных поверхностных артериях объективно отражает состояние волемического статуса пациента. Исследование кровотока в общей сонной артерии позволяет выявить пациентов, которые ответят на инфузионную терапию увеличением сердечного выброса. Оценка резистивных индексов в почечной и селезеночной артериях отражает состояние органной перфузии. Оценка резистивного индекса и характера кровотока в лучевой артерии в области анатомической табакерки позволяет неинвазивно оценить общее сосудистое сопротивление. Паттерны кровотоков в нижней полой и воротной венах, печеночных и внутripочечных венах могут выявить гипervолемию и обосновать необходимость в диуретической терапии. Важными достоинствами ультразвукового исследования являются его неинвазивность, доступность, простота проведения и интерпретации данных, а также возможность повторной оценки для контроля

проводимой терапии. Однако требуются дальнейшие исследования возможностей методов ультразвукового мониторинга в различных популяциях пациентов.

Конфликт интересов: авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования: авторы заявляют о финансировании проведенного исследования из собственных средств.

Литература / References

1. Кузьков В.В., Фот Е.В., Сметкин А.А., Лебединский К.М., Киров М.Ю. Волемический статус и фазовый подход к терапии критических состояний – новые возможности и перспективы. *Анестезиология и реаниматология*. 2015;60(6):65–70. [Kuz'kov VV, Fot EV, Smjotkin AA, Lebedinskij KM, Kirov MYu. Volemic status and the phasic approach to the treatment of critical states – new opportunities and prospects. *Russian Journal of Anaesthesiology and Reanimatology*. 2015;60(6):65–70 (in Russ.)].
2. Kupersztich-Hagege E, Teboul JL, Artigas A, Talbot A, Sabatier C, Richard C, Monnet X. Bioreactance is not reliable for estimating cardiac output and the effects of passive leg raising in critically ill patients. *Br J Anaesth*. 2013;11:961–6.
3. Orso D, Paoli I, Piani T, Cilenti FL, Cristiani L, Guglielmo N. Accuracy of Ultrasonographic Measurements of Inferior Vena Cava to Determine Fluid Responsiveness: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Intensive Care Med*. 2020;35(4):354–63. doi: 10.1177/0885066617752308
4. Ibarra-Estrada MÁ, López-Pulgarín JA, Mijangos-Méndez JC, et al. Respiratory variation in carotid peak systolic velocity predicts volume responsiveness in mechanically ventilated patients with septic shock: a prospective cohort study. *Crit Ultrasound J*. 2015;7,12. doi: 10.1186/s13089-015-0029-1
5. Yong Y, Wu D, Fernandes V, Kopelen HA, Shimoni S, Nagueh SF, et al. Diagnostic accuracy and cost-effectiveness of contrast echocardiography on evaluation of cardiac function in technically very difficult patients in the intensive care unit. *Am J Cardiol*. 2002;89:711–8.
6. Fazelinejad Z, Hanafi MG, Amirpebdani F, Mosavi A. Comparison of cardiac output measured by carotid artery Doppler ultrasound and echocardiography in patients admitted to Golestan and Imam Khomeini Hospitals in Ahvaz. *J Family Med Prim Care*. 2020;30(9(7)):3304–7. doi: 10.4103/jfmpc.jfmpc_32_20
7. Weber U, Glassford NJ, Eastwood GM, Bellomo R, Hilton AK. A pilot study of the relationship between Doppler-estimated carotid and brachial artery flow and cardiac index. *Anaesthesia*. 2015;70(10):1140–7. doi: 10.1111/anae.13069
8. Anile A, Ferrario S, Campanello L, Orban MA, Castiglione G. Renal resistive index: a new reversible tool for the early diagnosis and evaluation of organ perfusion in critically ill patients: a case report. *Ultrasound J*. 2019;10;11(1):23. doi: 10.1186/s13089-019-0138-3
9. Di Nicolò P, Granata A. Renal intraparenchymal resistive index: the ultrasonographic answer to many clinical questions. *J Nephrol*. 2019;32, 527–38. doi: 10.1007/s40620-018-00567-x
10. Hoste EA, Bagshaw SM, Bellomo R, Cely CM, Colman R, Cruz DN, et al. Epidemiology of acute kidney injury in critically ill patients: the multinational AKI-EPI study. *Intensive Care Med*. 2015;41(8):1411–23.
11. Кобалава Ж.Д., Виллевалде С.В., Ефремовцева М.А., Моисеев В.С. Биомаркеры острого повреждения почек: современные представления и перспективы. *Терапевтический архив*. 2014;86(6):88–93. [Kobalava ZhD, Villeval'de SV, Efremovtseva MA, Moiseev VS. Biomarkers of acute kidney injury: Current views and prospects. *Therapeutic Archive*. 2014;86(6):88–93 (In Russ.)].
12. McCullough PA, Shaw AD, Haase M, Bouchard J, Waikar SS, Siew ED, et al. Diagnosis of acute kidney injury using functional

- and injury biomarkers: workgroup statements from the tenth Acute Dialysis Quality Initiative Consensus Conference. *Contrib Nephrol.* 2013;182:13–29. doi: 10.1159/000349963
13. Rozemeijer S, Haitsma Mulier JLG, Röttgering JG, Elbers PWG, Spoelstra-de Man AME, Tuinman PR, et al. Renal Resistive Index: Response to Shock and its Determinants in Critically Ill Patients. *Shock.* 2019;52(1):43–51. doi: 10.1097/SHK.0000000000001246
 14. Darmon M, Schortgen F, Vargas F, Liazydi A, Schlemmer B, Brun-Buisson C, Brochard L. Diagnostic accuracy of Doppler renal resistive index for reversibility of acute kidney injury in critically ill patients. *Intensive Care Med.* 2011;37(1):68–76.
 15. Fu Y, He C, Bai Y, Zhang N, Zhao H. Value of the combination of renal resistive index and central venous pressure to predict septic shock induced acute kidney injury. *Zhonghua Wei Zhong Bing Ji Jiu Yi Xue.* 2020;32(4):473–7. doi: 10.3760/cma.j.cn121430-20191014-00062
 16. Song J, Wu W, He Y, Lin S, Zhu D, Zhong M. Value of the combination of renal resistance index and central venous pressure in the early prediction of sepsis-induced acute kidney injury. *J Crit Care.* 2018;45:204–8. doi: 10.1016/j.jcrc.2018.03.016
 17. Bobbio E, Bollano E, Polte CL, Ekelund J, Rådegran G, Lundgren J, et al. Association between central haemodynamics and renal function in advanced heart failure: a nationwide study from Sweden. *ESC Heart Fail.* 2022;9(4):2654–63. doi: 10.1002/ehf2.13990
 18. Corradi F, Via G, Tavazzi G. What's new in ultrasound-based assessment of organ perfusion in the critically ill: expanding the bedside clinical monitoring window for hypoperfusion in shock. *Intensive Care Med.* 2020;46(4):775–9. doi: 10.1007/s00134-019-05791-y
 19. Corradi F, Brusasco C, Garlaschi A, Santori G, Vezzani A, Moscatelli P, Pelosi P. Splenic Doppler resistive index for early detection of occult hemorrhagic shock after polytrauma in adult patients. *Shock.* 2012;38(5):466–73. doi: 10.1097/SHK.0b013e31826d1eaf
 20. Brusasco C, Tavazzi G, Robba C, Santori G, Vezzani A, Manca T, et al. Splenic Doppler Resistive Index Variation Mirrors Cardiac Responsiveness and Systemic Hemodynamics upon Fluid Challenge Resuscitation in Postoperative Mechanically Ventilated Patients. *Biomed Res Int.* 2018;2018:1978968. doi: 10.1155/2018/1978968
 21. Blehar DJ, Glazier S, Gaspari RJ. Correlation of corrected flow time in the carotid artery with changes in intravascular volume status. *J Crit Care.* 2014;29:486–8.
 22. Beier L, Davis J, Esener D, Grant C et Fields JM. Carotid Ultrasound to Predict Fluid Responsiveness. *J Ultrasound Med.* 2020;39:1965–76. doi: 10.1002/jum.15301
 23. Willie CK, Macleod DB, Shaw AD, Smith KJ, Tzeng YC, Eves ND, et al. Regional brain blood flow in man during acute changes in arterial blood gases. *J Physiol.* 2012;590:3261–75.
 24. Blanco P, Aguiar FM, Michael Blaivas M. Rapid Ultrasound in Shock (RUSH) Velocity-Time Integral A Proposal to Expand the RUSH Protocol. *J Ultrasound Med.* 2015;34:1691–700. doi: 10.7863/ultra.15.14.08059
 25. Marik PE, Levitov A, Young A, Andrews L. The use of bioreactance and carotid doppler to determine volume responsiveness and blood flow redistribution following passive leg raising in hemodynamically unstable patients. *Chest.* 2013;143:364–70.
 26. Kim DH, Shin S, Kim N, Choi T, Choi SH, Choi YS. Carotid ultrasound measurements for assessing fluid responsiveness in spontaneously breathing patients: corrected flow time and respirophasic variation in blood flow peak velocity. *Br J Anaesth.* 2018;121(3):541–9. doi: 10.1016/j.bja.2017.12.047
 27. Ban K, Kochi K, Imai K, Okada K, Orihashi K, Sueda T, et al. Novel Doppler technique to assess systemic vascular resistance: the snuffbox technique. *Circ J.* 2005;69(6):688–94.
 28. En-Pei Lee, Shao-Hsuan Hsia, Chung-Chi Huang, Kuo-Chin Kao, Oi-Wa Chan, Chia-Ying Lin, et al. Strong correlation between doppler snuffbox resistive index and systemic vascular resistance in septic patients. *J Crit Care.* 2019;49:45–9. doi: 10.1016/j.jcrc.2018.10.010
 29. Cui W, Xiaoting W, Hongmin Z, Longxiang S, Wei H, Dawei L. Association Between Doppler Snuffbox Resistive Index and Tissue Perfusion in Septic Patients. *Shock.* 2020;54(6):723–30. doi: 10.1097/SHK.0000000000001547
 30. Gotmaker R, Peake SL, Forbes A, Bellomo R. Mortality is Greater in Septic Patients With Hyperlactatemia Than With Refractory Hypotension. *Shock.* 2017;48(3):294–300. doi: 10.1097/SHK.0000000000000861
 31. Messmer AS, Moser M, Zuercher P, Schefold JC, Müller M, Pfortmueller CA. Fluid Overload Phenotypes in Critical Illness—A Machine Learning Approach. *J Clin Med.* 2022;11(2):336. doi: 10.3390/jcm11020336
 32. Messmer AS, Zingg C, Müller M, Gerber JL, Schefold JC, Pfortmueller CA. Fluid Overload and Mortality in Adult Critical Care Patients—A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies. *Crit Care Med.* 2020;48(12):1862–70. doi: 10.1097/CCM.00000000000004617
 33. Husain-Syed F, Birk HW, Ronco C, et al. Doppler-derived renal venous stasis index in the prognosis of right heart failure. *J Am Heart Assoc.* 2019;8(21):e013584. doi: 10.1161/JAHA.119.013584
 34. Koratala A, Reisinger N. Venous Excess Doppler Ultrasound for the Nephrologist: Pearls and Pitfalls. *Kidney Med.* 2022;4(7):100482. doi: 10.1016/j.xkme.2022.100482
 35. Beaubien-Souligny W, Benkreira A, Robillard P, Bouabdallaoui N, Chassé M, Desjardins G, et al. Alterations in Portal Vein Flow and Intrarenal Venous Flow Are Associated With Acute Kidney Injury After Cardiac Surgery: A Prospective Observational Cohort Study. *J Am Heart Assoc.* 2018;7(19):e009961. doi: 10.1161/JAHA.118.009961
 36. Argaziz ER, Rola P, Gamba G. Dynamic Changes in Portal Vein Flow during Decongestion in Patients with Heart Failure and Cardio-Renal Syndrome: A POCUS Case Series. *Cardiorenal Med.* 2021;11(1):59–66. doi: 10.1159/000511714
 37. Benkreira A, Beaubien-Souligny W, Mailhot T, Bouabdallaoui N, Robillard P, Desjardins G, et al. Portal Hypertension Is Associated With Congestive Encephalopathy and Delirium After Cardiac Surgery. *Can J Cardiol.* 2019;35(9):1134–41. doi: 10.1016/j.cjca.2019.04.006