

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2016.1.06  
УДК 616-073.173



## НОВЫЙ НЕИНВАЗИВНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ

**М.М. Манцкава**

Центр экспериментальной биомедицины им. И. Бериташвили, Грузия, 0160, Тбилиси, ул. Л. Готуа, 14,  
e-mail: mantskavamaka@rambler.ru

**Аннотация.** Резистивные артерии кровеносной системы являются предметом диагностических исследований для опосредованного исследования микроциркуляционного русла. При неизменном уровне общего артериального и венозного давлений скорость кровотока, измеряемого в резистивных артериях, зависит именно от состояния соответствующих резистивных артерий, образующихся при их ветвлениях. Автор использовал ультразвуковой прибор «Dop 8/4» (Германия) с четырьмя входами для зондов со встроенным самописцем. По динамике изменения скорости кровотока в лучевой и в подколенной артериях во всех отведениях после стандартной ишемии во время развития постишемической гиперемии можно судить о состоянии ветвлений резистивных артерий и о кровенаполнении микроциркуляционного русла. Для описания реакций резистивных артерий во всех отведениях, которые контролируют периферическое сопротивление и микроциркуляцию нами был введен коэффициент микроциркуляции  $k$ , который является отношением общего постишемического кровотока к среднему значению объемного фонового кровотока. Физический смысл коэффициента микроциркуляции – это отношение постгиперемического кровотока в четырех отведениях одновременно к усредненному фоновому кровотоку в единицу времени. Необходимость оценки периферической системы диктуется активным участием микроциркуляции в развитии заболеваний сердечно-сосудистой системы, нервно-гуморальных, эндокринных изменений, ангиологических патологий, заболеваний опорно-двигательной системы, при реконструктивных операциях, при постоперационном периоде и многих других патологических ситуациях. Прямые неинвазивные методы исследования микроциркуляции способствуют усовершенствованию тактики лечения болезней и их осложнений, в особенности при гипертонии, диабетической стопе, реконструктивных операциях, переломах, варикозном расширении вен, атеросклеротических явлениях, при аллергиях, при болезни Рейно и др.

**Ключевые слова:** резистивные артерии, микроциркуляция, коэффициент микроциркуляции.

### ВВЕДЕНИЕ

Кровообращение крови состоит из макро- и микроциркуляции. На анатомическом рубеже этих отделов расположены резистивные артерии. Будучи некими кранами кровообращения, резистивные артерии обеспечивают перегон крови на периферию. Функциональное состояние резистивных артерий зависит от эндотелиального фактора, а эластичность сосудов формирует тонус резистивных артерий. Резистивные артерии заботятся о внутрисосудистом состоянии крови,

а также косвенно играют роль в ангиогенезе, в обеспечении относительного параллелизма коагуляции/антикоагуляции, констрикции/дилатации. Нормальное кровоснабжение любых органов и тканей, постоянство уровня общего артериального давления в большой степени обусловлены периферическим сопротивлением кровеносной системы, за которую в ответе резистивные артерии. Адекватность микроциркуляции в органах и тканях обусловлена функциональным состоянием резистивных артерий, которые регулируют сосудистый просвет. Резистивные артерии участвуют в развитии компенсаторных и патологических процессов в системе регионального кровообращения и микроциркуляции. Кроме этого, резистивные артерии кровеносной системы являются предметом диагностических исследований для опосредованного исследования микроциркуляционного русла [7].

Настоящая работа посвящена описанию оригинального неинвазивного метода расчета коэффициента микроциркуляции путем оценки функционального состояния резистивных артерий.

Принцип оценки коэффициента микроциркуляции состоит в расчете возросшего притока крови и реакции резистивных артерий для упорядочения скорости кровотока при постишемической (реактивной) гиперемии, возникающей в результате стандартной остановки местного кровотока длительностью 60 с. Нами исследовался кровоток в местах пульсации на левой и правой лучевых артериях руки и левой и правой сторонах задних большеберцовых артерий ног в состоянии покоя (наименование отведений *SIN H*, *DEX H*, *SIN F*, *DEX F*) и при постишемической гиперемии в тех же отведениях. Исследования производились при помощи зондов аппарата Допплера (рис. 1).

Эффект Допплера заключается в специфическом изменении частоты колебаний ультразвука в зависимости от скорости движения источника звуковых колебаний, где источником являются эритроциты. Диаметр эритроцита не превышает 7 мкм без гематологических патологий. В зависимости от калибра сосудов ток крови отличается различными профилями скоростей. Эритроциты определяют профиль скоростей, и в зависимости от контура векторов сдвига разноскоростных потоков (эффект Магнуса) меняется профиль передвижения эритроцита, ундулируя движение мембран эритроцитов к непрерывному потоку. Направляя ультразвуковой сигнал на лучевые артерии (*SIN H*, *DEX H*) и на большеберцовые артерии (*SIN F*, *DEX F*), под углом  $45^\circ$

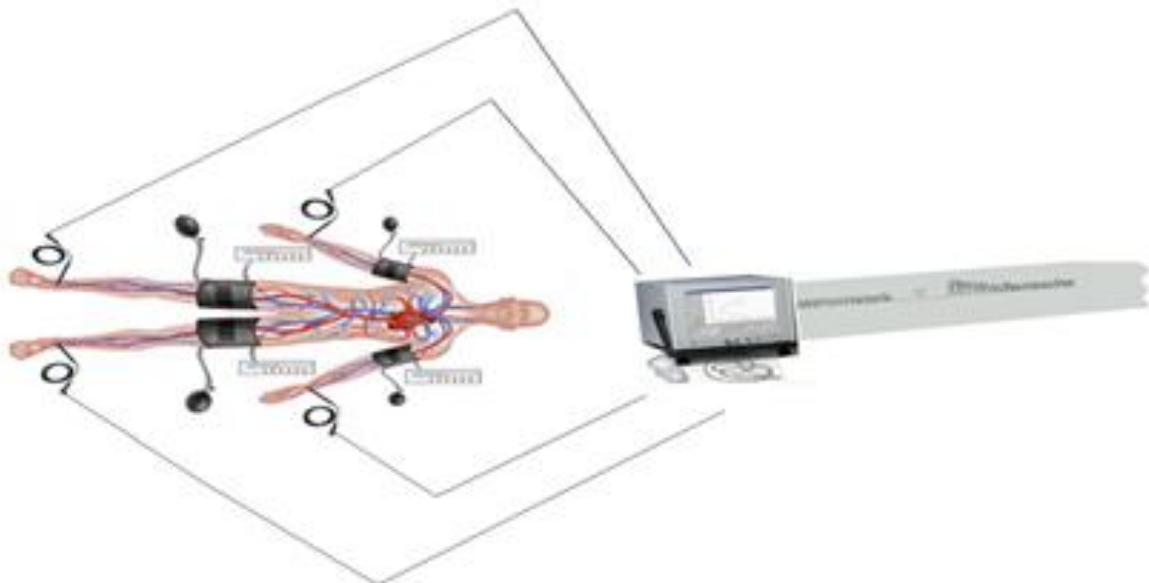


Рис. 1. Схема исследования микроциркуляции

регистрируем отражение этого сигнала от эритроцитов текущей крови, по сдвигу частоты падающего и отраженного сигналов определяем линейную скорость кровотока в соответствующих резистивных артериях, образующихся при ветвлениях этой артерии.

При неизменном уровне общего артериального и венозного давлений скорость кровотока, измеряемого в резистивных артериях, зависит именно от состояния соответствующих резистивных артерий, образующихся при их ветвлениях. По динамике изменения скорости кровотока в лучевой и задней большеберцовых артериях во всех отведениях после стандартной ишемии во время развития постишемической гиперемии можно судить о состоянии ветвлений резистивных артерий и о кровенаполнении микроциркуляционного русла.

Стандартизованную ишемию вызывали при помощи компрессии плечевых (левая, правая) и надколенных артерий (левая, правая). На рис. 2 приведена схема кровотока в одном из отведений в покое – нормальный (фоновый) кровоток, при ишемии – отсутствие кровотока, при постишемической гиперемии – возросший кровоток. Кривая скорости кровотока обрабатывалась при помощи аппарата текстурного анализа (*Tas-Plus, Leitz*) или альтернативным путем при помощи персонального компьютера со встроенной аналого-цифровой платой.

Автор использовал ультразвуковой прибор «*Dop 8/4*» (Германия) с четырьмя входами для зондов со встроенным самописцем. Для регистрации нормального (фоновый) кровотока зонд устанавливали в области хорошей слышимости пульсации на запястьи и медиальной лодыжке, повышая давление в манжетах сфигмоманометра, наложенных на плечевые и надколенные артерии, кровоток останавливали на 60 с. Через 60 с компрессия отпускаялась, давление в манжете быстро снижалось до нуля и развивалась постишемическая реактивная гиперемия. Регистрацию кровотока продолжали до тех пор, пока линейная скорость возросшего тока крови не возвращалась к нормальным фоновым значениям.

Микроциркуляция представляет собой часть кровеносного русла, посредством которой обеспечивается адекватное кровоснабжение органов и тканей организма. Естественно, что оценка микроциркуляции особенно информативна с точки зрения патогенеза болезней, их профилактики, лечения и прогноза. Сосудистые изменения: нарушения толщины, структуры и формы сосуда влияют на проницаемость сосуда и транскапиллярный обмен. При снижении скорости кровотока происходит закупорка артериол, что приводит к появлению плазматических капилляров, лишенных эритроцитов и не обеспечивающих полноценный транскапиллярный обмен. Такие нарушения возникают при многих болезнях: ДВС-синдроме (рассеянное внутрисосудистое свертывание), шоке различного происхождения, острых

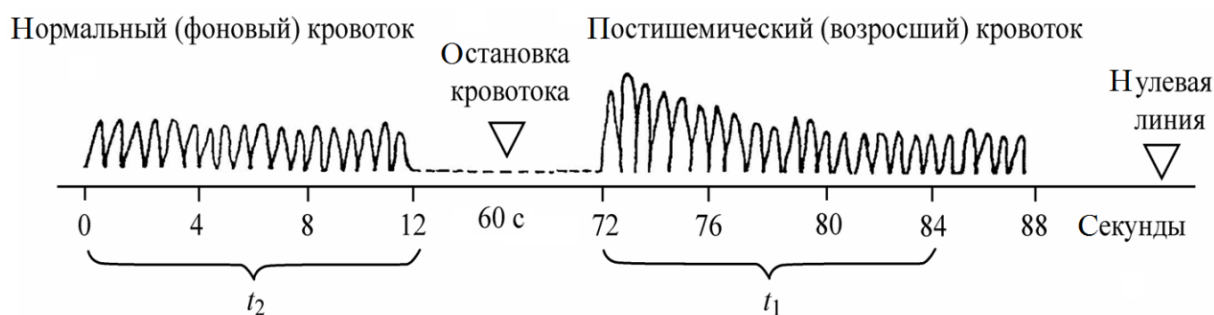


Рис. 2. Схема кривой линейного кровотока в одном из отведений

инфекционных процессах, коагулопатии. В нашем случае компрессия артерий столь краткосрочная, что, вероятнее всего, капилляры не закупориваются или «ослепляется» лишь малое их количество [3].

Уровень микроциркуляции является ключевым в сердечно-сосудистой системе, тогда как остальные уровни призваны обеспечивать его основную функцию – транскапиллярный обмен. Кровь с растворенными в ней кислородом и питательными веществами, необходимыми для метаболизма тканей, транспортируется из сосудистого пространства в капиллярную систему [6]. Этот процесс происходит по законам диффузии и определяется градиентом внутри- и внесосудистого гидравлического давления и градиентом внутри- и внесосудистого онкотического давления, посредством которого обеспечивается задержка жидкости в сосудах и возврат межтканевой жидкости.

Соотношение этих градиентов является основой диффузии жидкости в артериальной части капилляра и ее реабсорбции – в венозной. Онкотическое давление крови в нормальных условиях относительно постоянно. Поэтому детерминантой интенсивности транскапиллярного обмена и обеспечения нутритивных потребностей тканей является капиллярное гидростатическое давление [4, 5]. Остальные отделы сердечно-сосудистой системы обеспечивают установление и поддержание гидростатического давления [1, 2, 4].

Поэтому столь важно для оценки микроциркуляции исследовать реакцию резистивных артерий в четырех отведениях. При рабочей гиперемии на фоне расширения резистивных сосудов и увеличения скорости потока крови возрастает давление крови в капиллярах с усилением фильтрации крови; это сопровождается возрастанием показателя гематокрита, что обеспечивает адекватное снабжение тканей кислородом [5]. В условиях покоя возрастание тонуса резистивных сосудов сопровождается уменьшением притока крови, снижением капиллярного давления, усилением реабсорбции тканевой жидкости, уменьшением гематокрита и превращением части капилляров в плазматические – «слепые». Гидравлическое давление в капиллярах не всегда отражает системное давление. В патологических случаях оно способно изменяться независимо от изменений уровня артериального давления [1].

Расширение артериол приводит к возрастанию капиллярного давления даже на фоне сниженного артериального давления, после чего усиливается экстравазация, сгущение крови с прогрессирующим нарушением периферического кровообращения. Если в нормальных условиях величина капиллярного давления связана с тонусом прекапиллярных резистивных сосудов, регулирующих приток крови, то в патологических случаях затруднение оттока крови из капилляров в силу сокращения или механического сдавливания посткапиллярных отводящих сосудов – венул и вен – имеет решающее значение. Опираясь на эти фундаментальные законы, автор определял микроциркуляцию новой методикой, посредством которой стало возможным оценить коэффициент микроциркуляции.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемого помещали на медицинскую тахту в горизонтальном положении с раздвинутыми руками и ногами в нормальной освещенной комнате при комнатной температуре 20–23° С. Во всех четырех отведениях (*SIN H*, *DEX H*, *SIN F*, *DEX F*, которые соответствуют левой, правой точкам пульсации на кисти и левой, правой точкам пульсации на стопе) регистрировали нормальный фоновый линейный кровоток в виде кривой на самописце. Фоновый объемный кровоток равен сумме дискретных значений скорости, которая принимает все точки кривой в течение интервала времени  $t$ .

Следовательно, объемный кровоток в отведении  $SIN H$  равен  $\Sigma V_1 t$ , в отведении  $DEX H - \Sigma V_2 t$ , в отведении  $SIN F - \Sigma V_3 t$ , в отведении  $DEX F - \Sigma V_4 t$ . Средний фоновый кровоток равен суммарному фоновому кровотоку, деленному на 4, т.е.  $\Sigma \Sigma V_i t / 4 = (\Sigma V_1 + \Sigma V_2 + \Sigma V_3 + \Sigma V_4) t / 4$ , где  $t$  – интервал времени, при котором идет регистрация фонового кровотока. Суммарная постишемическая гиперемия является суммой возросшего объемного кровотока в тех же четырех отведениях  $SIN H, DEX H, SIN F, DEX F$ :  $\Sigma \Sigma V_{i_{пост}} t_{i_{пост}}$ , где  $V_{i_{пост}}$  – возросшая линейная скорость при постишемической гиперемии,  $t_{i_{пост}}$  – интервал времени, при котором возросшая линейная скорость при постишемической гиперемии достигнет нормальных фоновых значений.

Для описания реакций резистивных артерий во всех отведениях, которые контролируют периферическое сопротивление и микроциркуляцию, автором был введен коэффициент микроциркуляции  $k$ , который является отношением общего постишемического кровотока к среднему значению объемного фонового кровотока:

$$k = S_{пост} / S_{фон} = \Sigma \Sigma V_{i_{пост}} t_{i_{пост}} / \Sigma \Sigma V_i t.$$

После ряда преобразований получим:

$$k = 4(\Sigma V_1 t_1 + \Sigma V_2 t_2 + \Sigma V_3 t_3 + \Sigma V_4 t_4) / (\Sigma V_1 + \Sigma V_2 + \Sigma V_3 + \Sigma V_4) t,$$

где  $t_1, t_2, t_3, t_4$  – интервалы времени, при котором в разных отведениях возросший постишемический кровоток возвращался к нормальным фоновым значениям.

$$[k] = 4 \Sigma V_{i_{пост}} t_{i_{пост}} / \Sigma V_i t.$$

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ КОЭФФИЦИЕНТА МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ

Отношение постгиперемического кровотока в четырех отведениях одновременно к усредненному фоновому кровотоку в единицу времени равно коэффициенту микроциркуляции.

Необходимость оценки периферической системы диктуется активным участием микроциркуляции в развитии заболеваний сердечно-сосудистой системы, нервно-гуморальных, эндокринных изменений, ангиологических патологий, заболеваний опорно-двигательной системы, при реконструктивных операциях, при постоперационном периоде и многих других патологических ситуациях.

Воздействие на микроциркуляторное русло с целью лечебных и превентивных мероприятий является актуальным терапевтическим подходом. Это стало возможным благодаря поступлению на фармацевтический рынок большого количества лекарственных препаратов, воздействующих на стенку сосудов. Прямые неинвазивные методы исследования микроциркуляции способствуют совершенствованию тактики лечения болезней и их осложнений, в особенности при гипертонии, диабетической стопе, реконструктивных операциях, переломах, варикозном расширении вен, атеросклеротических явлениях, при аллергиях, при болезни Рейно и др.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование микроциркуляции на основе коэффициента микроциркуляции является очень информативным. Значимость данной методологии исследования общего периферического тока крови и реакции артериол обусловлена фундаментальными и клиническими разработками, а также финансовыми затратами. Если отметить,

что описанная в статье методика может быть легко освоена медицинским персоналом, ее легко использовать в стационарном и амбулаторном секторе, при ее применении не требуется больших площадей медицинского учреждения, аппаратура не является дорогостоящей и сам тест больному не причиняет неудобства, то можно рекомендовать включить описанный метод в перечень тестов функциональной диагностики как прямой и количественный метод определения микроциркуляции (без особых затрат со стороны лечебных учреждений, страховых компаний и пациента).

Опираясь на исследование коэффициента микроциркуляции, можно диагностировать кровоснабжение органов и тканей, вносить коррективы в тактику лечения, осуществлять превентивные мероприятия. Необходимо продолжить популяционные исследования, которые позволят лучше понять патогенез разных видов патологий в системе кровообращения, а также использовать методику для изучения болезней, связанных с нарушением функции резистивных артерий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович С.Г., Машанская А.В. Лазерная доплеровская флоуметрия в оценке микроциркуляции у здоровых людей и больных артериальной гипертензией // Сибирский медицинский журнал. – 2010. – Т. 92, № 1. – С. 57–59.
2. Бабарсков Е.В., Шулагин Ю.А., Черняк А.В. Неинвазивный метод исследования легочной микроциркуляции // Вестник новых медицинских технологий. – 2010. – Т. 2, № 18. – С. 271–273.
3. Козлов В.И. Микроциркуляция крови: оценка состояния и диагностика расстройств капиллярного кровотока // Тез. докладов V всерос. с междунар. участием школы-конференции. – М., 2012. – 110 с.
4. Парфенов А.С. Экспресс-диагностика сердечно-сосудистых заболеваний // Мир измерений. – 2008. – № 6. – С. 74–82.
5. Терехин С.С., Тихомирова И.А. Оценка микроциркуляции у лиц с разным уровнем резерва кровотока методом лазерной доплеровской флоуметрии и витальной биомикроскопии // Ярославский педагогический вестник (Естественные науки). – 2012. – Т. 3, № 3. – С. 141–144.
6. Kelly R.I., Pearse R., Bull R.H., Leveque J.L., de Rigal J., Mortimer P.S. The effects of aging on the cutaneous microvasculature // Journal of the American Academy of Dermatology. – 1995. – № 33. – P. 749–756.
7. Mchedlishvili G., Mantskava M., Urdulashvili T. Appraisal of functional state of the human resistance arteries // Russian Journal of Biomechanics. – 2004. – Vol. 8, № 1. – P. 55–59.

## NEW NONINVASIVE METHOD FOR MEASURING COEFFICIENT OF MICROCIRCULATION

**M.M. Mantskava (Tbilisi, Georgia)**

The resistive arteries of blood circulatory system appear to be the subject for indirect diagnostic studies of microcirculatory channel. At not altered level of general arterial and venous pressure, the blood flow velocity measured in the resistive arteries depends precisely on the state of the relevant resistive arteries as a result of their branching. Author used an ultrasonic device "Dop 8/4" (Germany) with four inputs for probes with built-in self-recorder. According to the dynamics of changes in blood flow velocity in the radial and popliteal arteries in all leads after standard ischemia during the development of postischemic hyperemia, the state of branching of the resistive arteries as well as the blood filling of microcirculatory channel can be judged. For description of the reactions of resistive arteries in all leads, which control a peripheral resistance and microcirculation, the coefficient of microcirculation  $k$  has been introduced, which appears to be the ratio of the total postischemic blood flow to the average volumetric background blood flow.

Physical meaning of microcirculation coefficient is the ratio of postischemic blood flow in four leads simultaneously to an average background blood flow in time unit. The necessity of the evaluation of peripheral system is dictated by the active participation of microcirculation in the development of cardiovascular system diseases, neurohumoral disorders, endocrine changes, angiologic pathologies, diseases of the musculoskeletal system, at reconstructive surgeries, at postoperative period and many other pathological situations. The direct noninvasive methods of research of microcirculation promotes to the improvement of the tactics for the treatment of diseases and their complications, especially at hypertension, diabetic foot, reconstructive surgeries, fractures, varicose phlebectasia, atherosclerotic phenomena, allergies, Raynaud's disease, etc.

**Key words:** resistive arteries, microcirculation, coefficient of microcirculation.

*Получено 9 марта 2016*