

Ю. А. Прыгова<sup>1,2</sup>, Л. А. Савельева<sup>1</sup>, О. Б. Богомякова<sup>1</sup>, А. А. Тулупов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт «Международный томографический центр» СО РАН  
ул. Институтская, 3А, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский национальный  
исследовательский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: akademgorod@ngs.ru

### **ОСОБЕННОСТИ ГЕМОДИНАМИКИ ВО ВНУТРЕННИХ СОННЫХ АРТЕРИЯХ, ПО ДАННЫМ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ\***

Усовершенствована магнитно-резонансная ангиографическая методика количественной оценки потока и изучены гемодинамические характеристики потока крови на разных уровнях внутренних сонных артерий (ВСА) у относительно здоровых людей. Обследованы 38 добровольцев без патологии сосудистой системы головного мозга. Оценивались гемодинамические показатели потока крови во внутренних сонных артериях на уровне четвертого, второго шейных позвонков, входа в сонный канал, каменистой и пещеристой частей. Оптимизированная методика количественной оценки потока может быть использована для определения гемодинамических показателей потока крови на разных уровнях ВСА. Получены значения пиковой, объемной, линейной скорости у здоровых людей. Достоверных отличий соответствующих скоростных показателей кровотока с правой и левой сторон не установлено.

*Ключевые слова:* магнитно-резонансная ангиография, гемодинамика, внутренние сонные артерии.

Головной мозг – одна из наиболее кровоснабжаемых областей человеческого организма. Достаточный приток артериальной крови обеспечивается за счет крупных магистральных артерий (позвоночных и сонных), образующих вертебробазилярный и каротидный бассейны. Благодаря образованию замкнутой системы посредством виллизьева круга и развитию коллатералей между этими бассейнами недостаток кровоснабжения в одном из магистральных сосудов компенсируется за счет других. Кроме того, при реализации механизмов ауторегуляции внутричерепного давления, колебание САД в широких пределах не приводит к значи-

тельному изменению давления в интракраниальных сосудах и мозгового кровообращения в целом. Несмотря на широкие компенсаторные возможности организма, длительная ишемия головного мозга проявляется яркими неврологическими симптомами, а в случае сосудистой катастрофы возможна прямая угроза жизни человека или инвалидизация со значительным снижением качества жизни.

Широкая распространенность цереброваскулярной патологии [1] обуславливает необходимость разработки новых подходов к изучению сосудистой системы человека и оптимизации существующих методик как

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке грантом Президента РФ в рамках государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-7643.2010.3), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № 16.740.11.0342 от 05.10.2010 и № 16.740.11.0605 от 31.05.2011), программой «У.М.Н.И.К.» (договор НИОКР № 16У/02-10 от 26.04.2010). Работа отмечена дипломом первой степени на секции клинической медицины XLIX Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 16–20 апреля 2011).

наиболее перспективных направлений в лучевой диагностике [2]. Магнитно-резонансная томография (МРТ) и ее приложение – магнитно-резонансная ангиография (МРА) – применяются для визуализации сосудов головы и шеи, а также определения характера, выраженности и локализации патологического процесса как наиболее безопасные, неинвазивные и высокоинформативные методы исследования сосудов. Разрабатываемые методики МРА позволяют не только визуализировать сосудистые структуры, но и количественно оценить изменение гемодинамических показателей потока. Однако до настоящего времени остаются недостаточно освещенными вопросы закономерностей и особенностей церебральной гемодинамики в норме и при патологии, до конца не разработаны специализированные импульсные последовательности, требуется адаптация имеющихся подходов в применении к магистральным артериям головы и шеи [3; 4]. Поэтому чрезвычайно важным направлением является развитие и оптимизация уже существующих методик МРА таким образом, чтобы максимально улучшить пространственное и временное разрешение получаемых изображений и получить максимум количественной и качественной информации при минимальной продолжительности обследования пациента [5–7].

**Цель** исследования – усовершенствовать методику МРА количественной оценки и изучить гемодинамические характеристики потока крови на разных уровнях внутренних сонных артерий (ВСА) у относительно здоровых людей.

### Материал и методы

Обследованы 38 человек в возрасте от 18 до 55 лет без отклонений в неврологическом статусе и при отсутствии в анамнезе неврологической патологии, а также отсутствии МР-признаков нарушения церебральной гемодинамики и МР-данных за объемное или очаговое поражение ткани головного мозга. Данная выборка сформирована случайным образом. Процедура привлечения к обследованию построена в соответствии с международными требованиями, которые включают информирование обследуемого, получение его письменного согласия на

проведение обследования в полном объеме и обеспечение конфиденциальности. Все исследования соответствовали этическим стандартам, разработанным в соответствии с Хельсинской декларацией Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 г. и «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ № 266 от 19.06.2003.

Исследование проводилось на высокопольном магнитно-резонансном томографе «Achieva» («Philips», Нидерланды) с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл. Во всех случаях с целью исключения патологии головного мозга и церебральной сосудистой системы исследование начинали с рутинного протокола МРТ, включающего получение T1- и T2-взвешенных изображений, изображений с подавлением МР-сигнала от свободной жидкости и диффузионно-взвешенных МР-томограмм. Кроме того, проводились бесконтрастные двухмерная МР-миелограмма и трехмерная МР-ангиограмма головы и области шеи. При отсутствии каких-либо патологических изменений детально изучались параметры церебрального кровотока по ВСА на шейном и интракраниальном уровнях.

С целью изучения динамических характеристик движения крови использована методика количественной оценки потока – Quantitative Flow (Q-Flow), которая основана на методе фазового контраста с кардиосинхронизацией по ЭКГ в ретроспективном режиме (непрерывный сбор данных в R–R интервале) с последующей реконструкцией и совмещением по времени сердечного цикла и полученных при исследовании профилей потока [8; 9].

В ходе оптимизации методики в применении к артериальной сосудистой системе физические параметры были подобраны таким образом, чтобы получаемые изображения обладали высоким отношением «сигнал – шум», а заданные технические параметры кровотока были согласованы со значениями скоростей кровотока в исследуемых сосудах [10]: TR (*time repetition* – время между повторениями электромагнитных импульсов) – 14 мс; TE (*time of echo* – время между 90° импульсом и максимальным эхо) – 8,3 мс; FA (*flip angle* – угол отклоне-

ния вектора намагниченности) –  $15^\circ$ ; матрица –  $256 \times 256$ ; толщина среза – 5 мм; количество срезов – 1; количество усреднений – 2; длительность исследования – 2 мин 57 с; коэффициент скорости потока – 90 см/с. С учетом сложной топографической ориентировки ВСА в пространстве и существующих анатомических вариантов их строения выбраны наиболее оптимальные уровни и ориентация пакетов срезов (рис. 1).

На каждом уровне, кроме четвертого, срезы проходили через правый и левый сосуды одновременно и располагались наиболее перпендикулярно их ходу, что позволило сократить время исследования и исключить артефакты от турбулентных потоков, возникающих при изгибе сосуда.

Регистрация МР-сигналов производилась непрерывно и сопровождалась записью электрокардиограммы на протяжении всего исследования, интервал между зубцами R–R разбивался на 15 частей. В результате для каждого среза получены 15 изображений, соответствующие определенной фазе сердечного цикла. Обработка полученной информации на рабочей станции включала обведение срезов полученных структур по границе зон с гиперинтенсивным сигналом (пульсирующая кровь) с созданием неправильной геометрической фигуры (ROI – *region of interest*), а также последующий полуавтоматический перенос геометрии на каждую из оставшихся четырнадцати фаз сердечного цикла. Учитывая вариабельность поперечного сечения исследуемых структур в разные фазы сердечного цикла, обвод контуров гемодинамически значимого просвета в некоторых случаях проводили вручную для каждой из 15 фаз. Внутри ROI с помощью программы постпроцессинга определялись площадь, линейная, объемная и пиковая скорости для каждой из 15 фаз кардицикла.

В процессе статистического анализа рассчитаны гемодинамические характеристики потока крови для каждого исследуемого уровня и представлены в виде среднего значения и доверительного интервала ( $X \pm ts_x$ ), где  $t = 1,96$  для  $p = 0,05$  и  $n = 38$ . Проведена оценка достоверности отличий между соответствующими показателями с правой и левой сторон на разных уровнях с применением  $t$ -критерия Стьюдента.

## Результаты исследования и обсуждение

Оптимизирована методика количественной оценки потока Q-Flow и разработан протокол МРТ-исследования, направленный на изучение особенностей гемодинамики в области головы и шеи. Для визуализации и исследования скоростных параметров потока крови по ВСА выбраны 5 уровней, что позволило провести комплексную многоуровневую оценку количественных параметров кровотока. Благодаря подбору оптимальных физических параметров методики за достаточно короткое время исследования получены кино-изображения ВСА на всех исследуемых уровнях, а также количественные данные о характере потока. Каждый срез отображал МР-картину состояния сосудистых структур, отдельную фазу сердечного цикла, а исследование в целом – динамические характеристики изменения потока крови по ВСА за кардицикл.

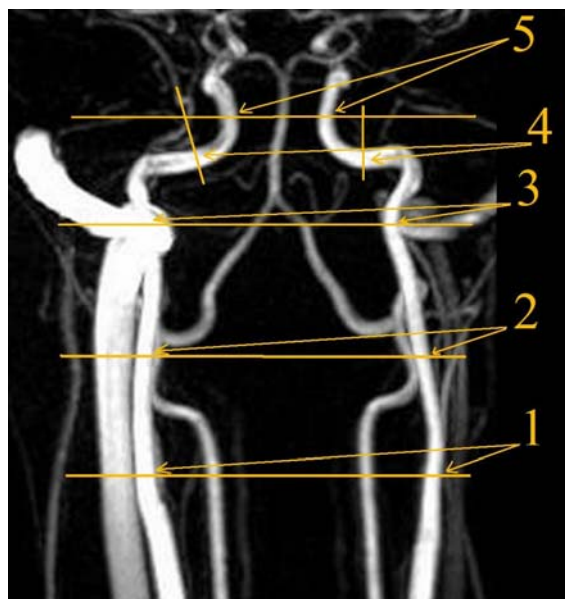
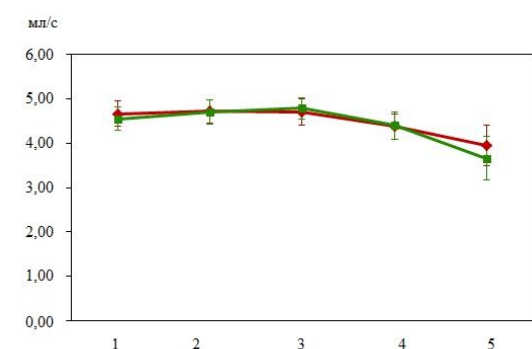
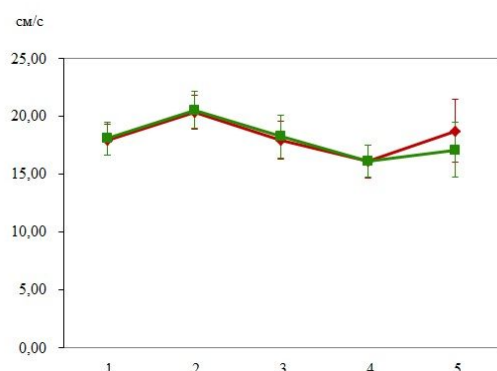


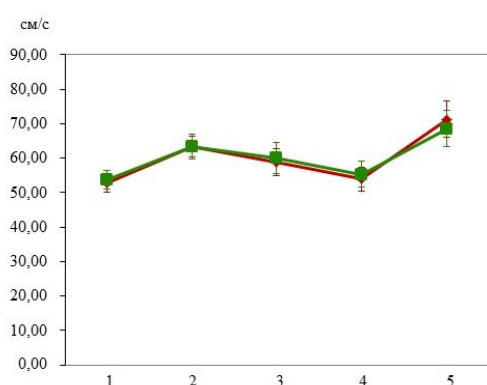
Рис. 1. Расположение срезов при МРА-исследовании внутренних сонных артерий: 1 – сразу после бифуркации общей сонной артерии, соответствует 4-му шейному позвонку ( $C_4$ ); 2 – середина наиболее протяженного и прямолинейного участка ВСА, соответствует 2-му шейному позвонку ( $C_2$ ); 3 – уровень входа ВСА в сонный канал, соответствует большому затылочному отверстию; 4 – горизонтальная часть внутренней сонной артерии в сонном канале, соответствующая каменной части артерии; 5 – вертикальная часть внутренней сонной артерии, соответствующая пещеристой части артерии



а



б



в

Рис. 2. Характеристика изменений некоторых скоростей потока артериальной крови на разных уровнях ВСА у относительно здоровых людей: а – объемная скорость; б – линейная скорость; в – пиковая скорость; 1 – С<sub>4</sub>; 2 – С<sub>2</sub>; 3 – уровень входа ВСА в сонный канал; 4 – горизонтальная часть внутренней сонной артерии в сонном канале; 5 – вертикальная часть внутренней сонной артерии

Для каждого уровня определены значения пиковой, средние за один кардиоцикл значения объемной, линейной скорости, площади гемодинамически значимого про-

света и их изменение в зависимости от фазы сердечного цикла, а также в зависимости от исследованного уровня (рис. 2). Графики изменения объемной и линейной скорости отражают динамику потока в RR интервале. Они характеризуются наличием двух пиков, первый из которых соответствует систоле желудочков, а второй – закрытию створок аортального клапана. Поток крови имел двуволновой характер на всех изученных уровнях, кроме уровня пещеристой части ВСА. Полученные графики имеют синфазный, симметричный характер для правой и левой ВСА и отражают пульсацию артерий в соответствии с деятельностью сердца. Это соответствует данным литературы, а также имеет сходство со сведениями, получаемыми при ультразвуковом дуплексном сканировании артерий шеи [11].

При анализе характера изменения потока крови по ходу ВСА отмечено, что объемная скорость увеличивалась на уровне входа в сонный канал, что может быть связано с ограничением пульсации артерий при прохождении через замкнутое костное пространство; в каменистой и пещеристой части постепенно снижалось, предположительно это происходит за счет сложного извитого хода сонного канала и отходящих ветвей ВСА в его полости (см. рис. 2, а). Пиковая и линейная скорости достигали максимума на уровне второго шейного позвонка: именно этот участок ВСА характеризуется наиболее продолжительным прямым ходом (см. рис. 2, б–в). Кроме того, сравнение графиков изменения просвета ВСА и скоростных показателей крови в зависимости от исследуемого уровня показало, что при уменьшении просвета сосуда показатели линейной и пиковой скорости увеличивались, а при увеличении просвета – скорости уменьшались.

Обнаружено, что на уровне пещеристой части внутренней сонной артерии ток крови имел сложный турбулентный характер, оценка его скоростных характеристик затруднена.

При сравнении скоростных показателей кровотока справа и слева достоверных отличий не обнаружено ( $p \geq 0,05$ ).

Таким образом, установлено, что движение артериальной крови по внутренним сонным артериям имеет сложный симметричный синфазный характер, необходимый

для адекватного кровоснабжения головного мозга, что играет важную роль в компенсаторных механизмах в случаях нарушений мозгового кровообращения. Применение предложенного МРТ-протокола позволяет получать достоверные количественные данные о характере артериального кровотока при небольшом времени исследования. Полученные количественные данные представляют существенную диагностическую ценность в качестве значений нормы и могут быть использованы при обследовании пациентов с изменениями церебрального кровотока. Предложенный протокол МРТ-исследования головы и шеи позволяет сопоставить изображения сосудов относительно топики и структуры патологического очага, что повышает специфичность метода.

## Выводы

1. Для определения характера гемодинамики по ВСА предложена оптимизированная МРТ-методика количественной оценки потока, которая расширяет возможности морфофункционального исследования церебрального кровоснабжения, позволяет не только качественно, но и количественно оценивать особенности потока крови в области головы и шеи.

2. Получены значения линейной, объемной, пиковой скоростей потока крови по ВСА на шейном и интракраниальном уровнях, а также произведена оценка площадей гемодинамически значимого просвета исследуемых сосудов у относительно здоровых людей.

3. Проведен комплексный многоуровневый анализ параметров гемодинамики по ВСА в исследуемых областях. Отмечено, что максимальные значения скоростей потока определяются на уровне второго шейного позвонка и входа в сонный канал.

4. Скоростные показатели гемодинамики на всех уровнях ВСА справа и слева достоверно не отличаются. Это свидетельствует о том, что симметричность артериального звена кровоснабжения головного мозга является необходимым условием для его нормального функционирования.

## Список литературы

1. Mathers C. D., Fat D. M., Inoue M., Rao C., Lopez A. D. Counting the Dead and What They Died from: an Assessment of the Global Status of the Cause of the Death Data // *Bul. World Health Organization*. 2005. Vol. 83. P. 171–177.
2. Gatehouse P. D., Keegan J., Crowe L. A., Masood S., Mohiaddin R. H., Kreitner K. F., Firmin D. N. Applications of Phase-Contrast Flow and Velocity Imaging in Cardiovascular MRI // *Eur. Radiol*. 2005. Vol. 15, № 10. P. 2172–2184.
3. Тулунов А. А., Летягин А. Ю., Курба-тов В. П., Савелов А. А., Коростышевская А. М., Маслова К. М., Левшакова Е. А., Смирнова Ф. Ю. Возможности магнитно-резонансной томографии в визуализации кровотока // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Биология, клин. медицина*. 2004. Т. 2, вып. 1. С. 57–69.
4. Steeden J. A., Atkinson D., Taylor A. M., Muthurangu V. Split-acquisition Real-time CINE Phase-contrast MR Flow Measurements // *Magn. Reson. Med*. 2010. Vol. 64, № 6. P. 1664–1670.
5. Russo V., Renzulli M., Buttazzi K., Fattori R. Acquired Diseases of the Thoracic Aorta: Role of MRI and MRA // *Eur. Radiol*. 2006. Vol. 16, № 4. P. 852–865.
6. Aksoy M., Alley M., Lansberg M., Hope T., Herfkens R., Moseley M., Bammer R. Streamline and Particle Trace Visualization of Major Intracranial Vessels Using 3D Time Resolved MRA // *Book of Abstracts ESMRMB 2005: 22<sup>nd</sup> Annual Scientific Meeting Basle*. Basle, Switzerland. 2005. P. 276.
7. Rolf M. P., Hofman M. B., Gatehouse P. D., Rossum A. C. van, Heethaar R. M. Offset Reduction in MR Velocity Measurements // *Eur. Radiol*. 2007. Vol. 18, № 4. P. 427–433.
8. Летягин А. Ю., Тулунов А. А., Савелов А. А., Коростышевская А. М. Магнитно-резонансная томография: возможности современной визуализационной технологии в клинической диагностике (лекция) // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Биология, клин. медицина*. 2004. Т. 2, № 3. С. 63–86.
9. Zhao M., Amin-Hanjani S., Ruland S., Curcio A. P., Ostergren L., Charbel F. T. Regional Cerebral Blood Flow Using Quantitative

MR Angiography // Am. J. Neuroradiol. 2007. Vol. 28, № 8. P. 1470–1473.

10. *Корниенко В. Н., Пронин И. Н.* Диагностическая нейрорадиология. М., 2006.

11. *Лелюк В. В., Лелюк С. Э.* Ультразвуковая ангиология. М., 1999.

*Материал поступил в редколлегию 21.09.2011*

**Yu. A. Prygova, L. A. Savelyeva, O. B. Bogomyakova, A. A. Tulupov**

**CHARACTERISTICS OF ARTERIAL BLOOD FLOW ON THE INTERNAL CAROTID ARTERIES USING MAGNETIC RESONANCE IMAGING**

To improve phase contrast angiography technique of flow measurement and to quantify hemodynamic parameters of arterial blood flow at intracranial and cervical levels of the internal carotid arteries (ICA) using magnetic resonance imaging. The 38 volunteers without vascular disorders were examined with 2D phase contrast MR-angiography retrospectively cardiac triggered. Quantitative characteristics of arterial blood flow were defined at C<sub>4</sub>, C<sub>2</sub> cervical levels, carotid channel entrance, petrous part of ICA, cavernous part of ICA. The phase contrast MRI can be successfully applied to quantification of arterial blood flow at the different levels of the ICA. The normal values of mean velocity, mean flux, peak velocity were defined using Q-Flow technique. All measured hemodynamic parameters have no side-to-side difference.

*Keywords:* magnetic resonance angiography, hemodynamic, internal carotid arteries.