

ОЦЕНКА ЦЕРЕБРАЛЬНОГО КОЛЛАТЕРАЛЬНОГО СТАТУСА ПО ДАННЫМ КОМПЬЮТЕРНО-ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ АНГИОГРАФИИ ПРИ ИШЕМИЧЕСКОМ ИНСУЛЬТЕ: ОБЗОР МЕТОДОВ РУЧНОЙ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ

Д.Д. Долотова^{1,2}, Е.Р. Благодосклонова², Г.Р. Рамазанов³, И.В. Архипов^{2,4}, С.С. Петриков³, А.В. Гаврилов^{2,4}

¹ОСП «Научно-исследовательский клинический институт педиатрии им. акад. Ю.Е. Вельтищева», ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России; Россия, 117997 Москва, ул. Островитянова, 1;

²ООО «Гаммамед-Софт»; Россия, 127473 Москва, 3-й Самотечный пер., 1, стр. 1;

³ГБУЗ «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского Департамента здравоохранения г. Москвы»; Россия, 129090 Москва, Большая Сухаревская пл., 3;

⁴НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобелыцина, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»; Россия, 119234 Москва, ул. Ленинские горы, 1, стр. 2

Контакты: Дарья Дмитриевна Долотова dolotova@multivox.ru

При ишемическом инсульте состояние церебрального коллатерального кровотока – один из ключевых факторов, определяющих исход заболевания. Дигитальную субтракционную ангиографию принято считать «золотым стандартом» оценки церебрального коллатерального кровотока. Однако компьютерно-томографическая ангиография – наиболее распространенный метод, характеризующийся высокой степенью согласованности с дигитальной субтракционной ангиографией. В настоящее время представлено несколько шкал визуальной оценки степени развитости церебрального коллатерального кровотока на изображениях компьютерно-томографической ангиографии. Шкалы описывают как бассейн инсульт-связанной церебральной артерии в целом, так и подробно отдельные характеризующие его различные области. Неоднократно показана связь балльной оценки с тяжестью неврологического дефицита, а также объемом церебральной ишемии. Однако единого мнения о наиболее надежном методе описания церебрального коллатерального статуса до сих пор не сложилось. Применение современных методов обработки медицинских изображений и искусственного интеллекта позволило сделать значительный шаг в сторону автоматизации оценки коллатерального статуса, несомненные преимущества которой – высокая скорость вычисления и неподверженность субъективному мнению. Несмотря на то что исследования в данном направлении немногочисленны, внедрение автоматизированных решений в практику уже показало свою эффективность. В рамках данного обзора рассмотрены шкалы для ручной оценки церебрального коллатерального статуса, приведены показатели их надежности, а также описаны современные направления решения задач автоматизированной оценки состояния коллатералей при ишемическом инсульте.

Ключевые слова: церебральный коллатеральный статус, ишемический инсульт, компьютерно-томографическая ангиография, лептоменингеальные артерии, искусственный интеллект

Для цитирования: Долотова Д.Д., Благодосклонова Е.Р., Рамазанов Г.Р. и др. Оценка церебрального коллатерального статуса по данным компьютерно-томографической ангиографии при ишемическом инсульте: обзор методов ручной и автоматизированной оценки. Нейрохирургия 2022;24(2):113–21. DOI: 10.17650/1683-3295-2022-24-2-113-121.

Evaluation of cerebral collateral status using computed tomography angiography in ischemic stroke: review of manual and automated methods

D.D. Dolotova^{1,2}, E.R. Blagodoskloнова², G.R. Ramazanov³, I.V. Arkhipov^{2,4}, S.S. Petrikov³, A.V. Gavrilov^{2,4}

¹Veltischev Research and Clinical Institute for Pediatrics, Pirogov Russian National Research Medical University (Pirogov Medical University); 1 Ostrovitianov St., Moscow 117997, Russia

²Gammamed-Soft; Bld. 1, 3rd Samotechnny lane, Moscow 127473, Russia;

³*N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine, Moscow Healthcare Department; 3 Bolshaya Sukharevskaya Sq., Moscow 129090, Russia;*

⁴*Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University; Bld. 2, 1 Leninskie gory Str., Moscow 119234, Russia*

Contacts: Darya Dmitrievna Dolotova dolotova@multivox.ru

In ischemic stroke, the condition of cerebral collateral circulation is one of the key factors determining the outcome. Digital subtraction angiography is considered the gold standard of evaluation of cerebral collateral circulation. However, computed tomography angiography is the most widely used method characterized by high level of conformity with subtraction angiography. Currently, several scales of visual evaluation of collateral circulation development in images obtained by computed tomography angiography are used. The scales describe the territory of stroke-associated cerebral artery, as well as details of various areas of the territory. The association between the score and severity of neurological deficit and volume of cerebral ischemia was demonstrated in numerous studies. However, consensus on the most reliable method of description of cerebral collateral status has not been reached. Use of modern methods of processing of medical images and artificial intelligence allowed to make a significant step towards automatization of collateral status evaluation with such benefits as high processing speed and resistance to subjective opinion. Despite low number of studies on this subject, implementation of automated solutions has already showed its effectiveness. In this review, scales for manual evaluation of cerebral collateral status are considered, their reliability is described, and current approaches to automated evaluation of collateral circulation in ischemic stroke are presented.

Key words: cerebral collateral status, ischemic stroke, computed tomography angiography, leptomeningeal arteries, artificial intelligence

For citation: Dolotova D.D., Blagosklonova E.R., Ramazanov G.R. et al. Evaluation of cerebral collateral status using computed tomography angiography in ischemic stroke: review of manual and automated methods. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2022;24(2):113–21. (In Russ.). DOI: 10.17650/1683-3295-2022-24-2-113-121.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно опубликованным данным различных стран, ишемический инсульт (ИИ) до сих пор остается одной из основных причин смертности и инвалидизации населения [1, 2]. Факторы, влияющие на исход заболевания, во многом определены, и важность их учета при выборе тактики ведения пациента неоднократно подчеркивалась в клинических рекомендациях и руководствах [3–5]. К таким факторам относят: время от момента появления симптомов заболевания до поступления в стационар; наличие сопутствующей патологии; исходная степень тяжести неврологического дефицита и др. Из признаков, выявляемых с помощью радиологических методов исследования, обязательно учитывают наличие прямых и косвенных свидетельств ИИ на нативной компьютерной томографии (КТ); выполняют оценку объема поражения по шкале ASPECTS (Alberta Stroke Program Early CT score — шкала оценки ранних КТ-признаков ишемического инсульта головного мозга); исключают окклюзию инсульта-связанной артерии при помощи компьютерно-томографической ангиографии (КТА).

Один из признаков, определяющих исход заболевания и эффективность лечения, — степень развитости церебральных коллатеральных сосудов в области поражения [6]. В ранее опубликованных исследованиях неоднократно показано, что наличие хорошо развитых церебральных коллатералей коррелирует с лучшим исходом заболевания [7, 8]. Кроме того, степень выраженности церебральных коллатералей служит предиктором итогового объема ишемии вне зависимости от того, была ли проведена реперфузионная терапия или нет [9].

«Золотым стандартом» определения церебрального коллатерального статуса принято считать дигитальную субтракционную ангиографию (ДСА). Однако данная процедура обладает такими важными недостатками, как инвазивность и высокая стоимость исследования. В то же время, КТА характеризуется высокой степенью согласованности с ДСА (более 90 %), при этом, не является инвазивной процедурой, и ее проведение сопряжено с меньшей лучевой нагрузкой. Магнитно-резонансная ангиография требует больше времени и длительной неподвижности пациента во время исследования. Таким образом, КТА можно считать наиболее перспективной модальностью оценки церебрального коллатерального статуса по ряду причин:

- 1) позволяет визуализировать сосуды в высоком пространственном разрешении;
- 2) широко распространена в связи со значительной степенью оснащенности медицинских учреждений КТ;
- 3) процедура непродолжительна и практически не увеличивает промежуток времени до начала ревазкуляризирующих вмешательств.

Различными авторскими коллективами предложено несколько качественных и полуколичественных шкал оценки церебральных коллатералей на изображениях КТА, а также проведены исследования, посвященные анализу их надежности и межэкспертной согласованности. Кроме того, в последнее время стали появляться программы автоматизированной оценки церебрального коллатерального статуса, что обусловлено стремительным развитием методов анализа медицинских изображений и цифровых технологий.

В рамках данной статьи рассматриваются основные шкалы оценки церебрального коллатерального статуса, обсуждаются их особенности и возможности, а также текущие разработки в области автоматизированной оценки.

РУЧНАЯ ОЦЕНКА ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ КОЛЛАТЕРАЛЕЙ ПО ШКАЛАМ

В настоящее время представлено не менее 8 шкал визуальной оценки состояния церебрального коллатерального статуса по данным КТА, число градаций в которых варьирует от 2 до 20. Наиболее ранние исследования предполагали использование исходных КТА-изображений (CTA-SI—CT-angiography source image) без какой-либо дополнительной компьютерной обработки, однако в последующем в связи с увеличением функционала рабочих станций КТ стали чаще использовать мультипланарные реконструкции (MPR, multiplanar reconstruction) и проекцию максимальной интенсивности (MIP, maximum intensity projection). Подробное описание шкал представлено далее в порядке увеличения числа градаций в них.

Бинарные шкалы P. Schramm и J.C. Tan

Впервые бинарная шкала оценки церебральных коллатералей предложена P. Schramm и соавт. (2002) [8]. При анализе CTA-SI церебральные коллатерали вокруг области поражения характеризовали как хорошо или слабо развитые (Good/Poor). При этом на небольшой выборке из 20 пациентов с ИИ показано, что наличие церебральных коллатералей служит предиктором благоприятного исхода заболевания и небольшого объема ишемии.

Данная шкала была применена J.C. Tan и соавт. (2007) для оценки коллатерального статуса у 55 пациентов по данным КТА на аксиальных срезах и на MPR, но без использования проекции максимальной интенсивности [9]. Значимой корреляции с итоговым объемом церебральной ишемии не установлено. Сделан вывод о предпочтительном использовании проекции максимальной интенсивности и более расширенной шкалы, которая будет рассмотрена далее.

3-балльные шкалы M. Knauth и F. Miteff

Одна из первых предложенных шкал — 3-балльная шкала M. Knauth и соавт. (1997), в которой на основе анализа исходных изображений и 3-мерной реконструкции предполагался выбор одной из следующих категорий: good — есть заполнение ветвей средней мозговой артерии (СМА) в Sylvian борозде (*s. Sylvii*); moderate — коллатерали видны, но не в *s. Sylvii*; absent — артерии после места окклюзии не видны [10]. Установлена высокая степень межэкспертной согласованности для данной шкалы (88 %), а также корреляция со степенью тяжести неврологического дефицита после лечения ($r = 0,46$) [11].

Использование проекции максимальной интенсивности и другие 3 варианта описания церебрального коллатерального статуса предложены F. Miteff и соавт. (2009) [12]. Наличие сосудов в бассейне СМА каждого из 92 пациентов характеризовалось с помощью ряда категорий: poor — обедненный кровоток, видимый только в поверхностных артериях; moderate — умеренный кровоток, видимый в поверхностных артериях и в сосудах *s. Sylvii*; good — хороший кровоток с наполнением сосуда сразу после места окклюзии. Показано, что степень неврологического дефицита, оцененная при помощи шкалы NIHSS (National Institutes of Health Stroke Scale — Национальные институты здравоохранения США), и степень выраженности церебральных коллатералей служат независимыми предикторами хорошего функционального исхода (0–2 балла по модифицированной шкале Рэнкина, mRS) спустя 3 мес после ИИ. При построении решающего правила на основе логистической регрессии авторы использовали бинарную разбивку, объединив варианты с обедненным и умеренным кровотоком, и показали, что она характеризуется большей мерой межэкспертной согласованности, чем 3-балльная шкала. Тем не менее, она вошла в литературу под названием шкалы Miteff и в последующем применялась в других исследованиях.

4-балльная шкала J.C. Tan

В качестве альтернативы бинарной шкалы J.C. Tan и соавт. предложили использовать шкалу J.J. Kim и соавт. (2004) [13], исходно предназначенную для анализа изображений ДСА и включающую 4 градации: 0 — отсутствие коллатералей; 1 — коллатерали представлены менее чем на 50 % территории пораженного бассейна; 2 — коллатерали заполняют более 50 % территории пораженного бассейна; 3 — коллатерали представлены на 100 % пораженной территории [9]. В дальнейших исследованиях (85 пациентов) показано, что данная оценка, выполненная по проекциям максимальной интенсивности, демонстрирует умеренную корреляцию с показателями перфузии ишемизированного участка, а при проведении регрессионного анализа была установлена связь с итоговым объемом ядра инсульта [7].

5-балльная шкала E.S. Rosenthal и 10-балльная шкала M.B. Maas

Впервые шкалу, подразумевающую сравнение коллатерального статуса инсульт-связанного бассейна с контралатеральным, предложили E.S. Rosenthal и соавт. (2008) [14]. Шкала включала 5 градаций, самый высокий балл соответствовал картине с сильно выраженными сосудами на пораженной стороне относительно интактного полушария (см. таблицу). При анализе данных 44 пациентов с ИИ существенного влияния церебрального коллатерального статуса на клинический исход заболевания не выявлено.

Однако в 2009 г. шкала Rosenthal была применена М.В. Маас и соавт. дифференцированно для сосудов *s. Sylvii* и лептоменингеальных артерий [15]. На выборке из 369 пациентов без тромболитической терапии исследователи показали, что вне зависимости от наличия окклюзии при хороших церебральных коллатералах (3–5 баллов) ухудшение неврологического статуса по NIHSS встречалось достоверно реже, чем у пациентов с отсутствующими или слабовыраженными коллатералами (1–2 балла). Частота клинического ухудшения более чем на 1 балл по NIHSS для случаев со слабовыраженными сосудами в *s. Sylvii*, лептоменингеальными артериями и при их комбинации составила 34,1, 45,8 и 55,6 % соответственно. В последующем данная шкала использовалась в других исследованиях под названием шкалы Маас.

20-балльная шкала на основе ASPECTS

Наиболее подробная шкала оценки церебрального коллатерального статуса — ее комбинация со шкалой ASPECTS [16]. Для базальных ганглиев (хвостатое ядро, внутренняя капсула, кора островка, чечевицеобразное ядро) и кортикальных регионов (на уровне базальных ганглиев — передняя кора (M1), кора латерального островка (M2), задняя кора (M3); на уровне желудочков над базальными ганглиями — передняя (M4), латеральная (M5) и задняя (M6) территории СМА) предполагается 3-балльная оценка нарушения прохождения контраста, в которой 0 соответствует отсутствию артерий, а 2 — наличию сосудов, эквивалентных или более выраженных, чем в контрлатеральном полушарии (см. таблицу). Таким образом, значения оценки по данной шкале варьируют от 0 до 20 баллов.

НАДЕЖНОСТЬ И СОГЛАСОВАННОСТЬ ШКАЛ ОЦЕНКИ ЦЕРЕБРАЛЬНОГО КОЛЛАТЕРАЛЬНОГО СТАТУСА

Поскольку в профессиональном сообществе до сих пор не сложилось общепринятого мнения о едином

подходе к оценке церебральных коллатералей, задачи проведения сравнительного анализа существующих шкал и поиска наиболее информативного и надежного способа оценки до сих пор актуальны и попытки их решения широко представлены в литературе [17, 18]. В исследовании L.L.L. Yeо и соавт. (2015), основанном на выборке из 200 пациентов с ИИ, проведено сравнение 4 шкал: Miteff, Маас, бинарной шкалы Tan и 20-балльной шкалы на основе ASPECTS [19]. Наибольшей надежностью в предсказании хорошего клинического исхода заболевания (mRs 0–2 балла) обладала шкала Miteff, однако по показателю межэкспертной согласованности ее незначительно превзошла бинарная шкала Tan (0,93 vs. 0,91, каппа-статистика). Показано, что ни одна из шкал не была значима в предикции летального исхода и симптомной геморрагической трансформации. В другой работе также было показано, что бинарная шкала обладает большими показателями межэкспертной согласованности (0,97 vs. 0,93 для шкалы Miteff) [12].

Проверка 4-балльной шкалы Tan показала ее не очень высокую межэкспертную согласованность (0,64 на основе данных 269 пациентов) [20], хотя исследователи рассчитали следующую межэкспертную корреляцию: ICC = 0,87 (95 % CI = 0,80–0,91) [7]. Подобные различия могут быть обусловлены как разнородным составом выборок, так и разным уровнем подготовки радиологов, выступавших в качестве экспертов.

Сводная информация по каждой из рассмотренных шкал с кратким описанием градаций в каждой из них представлена в таблице.

Объединяющая черта всех научных исследований, в которых применяли ту или иную шкалу оценки, — это работа с ретроспективными данными, но не с актуальными, полученными в процессе медицинской помощи пациенту. Публикаций, посвященных временным затратам на заполнение протокола КТА с включением оценки церебрального коллатерального статуса, в настоящее время не представлено.

Сводные данные о шкалах оценки церебрального коллатерального кровотока (по изображениям компьютерно-томографической ангиографии)
Summary of scales describing cerebral collateral circulation (using computed tomography angiography images)

Балльная шкала Score system	Параметры изображений Image parameters	Описание шкалы Description
Шкала Schramm, 2002 [8] Schramm Scale, 2002 [8]	CTA-SI	Развитость коллатералей в области ишемического инсульта: Collateral development in the area of ischemic stroke: poor — обедненные; poor — poorly developed; good — хорошо развитые good — well developed
Шкала Tan, 2007 [9] Modified Tan Scale, 2007 [9]	CTA, MPR	Развитость коллатералей в области ишемического инсульта: Collateral development in the area of ischemic stroke: poor — обедненные; poor — poorly developed; good — хорошо развитые good — well developed

Окончание таблицы

End of table

Балльная шкала Score system	Параметры изображений Image parameters	Описание шкалы Description
Шкала Knauth, 1997 [10] Knauth Scale, 1997 [10]	СТА-SI, 3D-реконструкция CTA-SI, 3D reconstruction	absent — артерии после окклюзии не видны; absent — arteries after occlusion are not visible; moderate — коллатерали видны, но не в <i>s. Sylvii</i> ; moderate — collaterals are visible but not in the <i>s. Sylvii</i> ; good — есть заполнение ветвей средней мозговой артерии в <i>s. Sylvii</i> good — filling of the branches of the medial cerebral artery in the <i>s. Sylvii</i> is present
Шкала Miteff, 2009 [12] Miteff System, 2009 [12]	СТА, MIP	Оценка кровотока: Circulation evaluation: poor — обедненный, видимый только в поверхностных артериях; poor — visible only in the superficial arteries; moderate — умеренный, видимый в поверхностных артериях и сосудах <i>s. Sylvii</i> ; moderate — visible only in the superficial arteries and vessels of the <i>s. Sylvii</i> ; good — хороший, с наполнением сосуда сразу после места окклюзии good — vessels directly near the occlusion area are filled
4-балльная шкала Tan, 2007 [9] Tan Scale, 2007 [9]	СТА, MIP	Коллатерали (часть заполненной ими территории пораженного бассейна): Collaterals (part of the territory of the affected system): 0 — отсутствие; 0 — absent; 1 — менее 50 %; 1 — less than 50 %; 2 — более 50 %; 2 — more than 50 %; 3 — 100 % 3 — 100 %
Шкала Rosenthal, 2008 [14] Rosenthal Scale, 2008 [14]	СТА-SI	Оценка сосудов, основанная на сравнении с интактной стороной: Evaluation of vessels based on comparison with the intact side: 1 — отсутствие сосудов; 1 — absence of vessels; 2 — менее выражены на пораженной стороне, чем на интактной; 2 — less pronounced on the affected side compared to the intact side; 3 — представлены в той же мере, что и на интактной стороне; 3 — same as at the intact side; 4 — на пораженной стороне больше выражены, чем на интактной; 4 — more pronounced on the affected side compared to the intact side; 5 — сильно выражены на пораженной стороне 5 — pronounced on the affected side
Шкала Maas, 2009 [15] Maas System, 2009 [15]	СТА-SI	Оценка, основанная на сравнении с интактной стороной. Оценка сосудов (отдельная для артерий <i>s. Sylvii</i> и лептоменингеальных артерий): Evaluation based on comparison with the intact side. Evaluation of vasculature (separate for arteries of the <i>s. Sylvii</i> and leptomeningeal arteries): 1 — отсутствие сосудов; 1 — absence of vessels; 2 — менее выражены на пораженной стороне, чем на интактной; 2 — less pronounced on the affected side compared to the intact side; 3 — представлены в той же мере, что и на интактной стороне; 3 — same as at the intact side; 4 — на пораженной стороне больше выражены, чем на интактной; 4 — more pronounced on the affected side compared to the intact side; 5 — сильно выражены на пораженной стороне 5 — pronounced on the affected side
Шкала на основе ASPECTS, 2016 [16] Regional Leptomeningeal Score (based on ASPECTS), 2016 [16]	СТА-SI	Оценка, основанная на сравнении с интактной стороной. Оценка артерий в 10 областях, идентичных областям шкалы ASPECTS: Evaluation based on comparison with the intact side. Evaluation of arteries in 10 areas identical to the areas of the ASPECTS scale: 0 — не видны; 0 — not visible; 1 — менее выражены, чем в контралатеральном полушарии; 1 — less pronounced than in the contralateral hemisphere; 2 — эквивалентны или более выражены, чем в контралатеральном полушарии 2 — equivalent or more pronounced than in the contralateral hemisphere

Другая тенденция в использовании шкал, предусматривающих от 3 и более категорий, — стремление привести их к бинарному виду при использовании в качестве прогностических переменных для решающих правил [12, 15].

Важно отметить, что работы с применением перечисленных шкал практически не встречаются в отечественных публикациях. Единственная шкала, упомянутая в российских рекомендациях по ведению пациентов с ИИ [4], — шкала Американского общества интервенционной и терапевтической радиологии (ACG) [21, 22], включающая 5 градаций, где 0 — отсутствие коллатералей к области ишемии, 4 — наличие быстрого и полного коллатерального кровотока по всей области ишемии. Однако данная шкала разработана исключительно для ДСА.

РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ ЦЕРЕБРАЛЬНОГО КОЛЛАТЕРАЛЬНОГО СТАТУСА

Несмотря на редкую практику использования шкал в повседневной работе врачей-радиологов, перспективным представляется создание автоматизированных средств оценки коллатерального статуса с применением методов искусственного интеллекта. В последнее время появилось несколько разработок, уже получивших коммерческую реализацию и установленных

во многих лечебных учреждениях или находящихся на этапе программной реализации и валидации.

Одна из наиболее передовых разработок — модуль e-CTA от Brainomix, Великобритания (<https://www.brainomix.com/e-cta/>), оценивающий объем сосудистого русла и выдающий заключение в виде визуального представления области с обедненными коллатеральными и балльной оценки, соответствующей 4-балльной шкале Tap (рис. 1). Продемонстрировано, что при использовании Brainomix e-CTA межэкспертная согласованность о степени развитости коллатералей возрастает с 0,58 (0,46–0,67) до 0,77 (0,66–0,85; $p = 0,003$) [23]. В исследовании на данных 235 пациентов также был показан высокий уровень согласованности с экспертным мнением, причем в случае бинарной шкалы он достигал 0,853 [24].

Компания RapidAI (США), работающая над этой задачей с 2008 г. и получившая одобрение FDA (Food and Drug Administration, Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов), оценивает «плотность» сосудов в области интереса (<https://www.rapidai.com/>) и характеризует степень их обеднения относительно интактного полушария по 4 градациям (до 45, 45–60, 60–75, более 75 %), каждой из которых соответствует свой цвет (рис. 2).

О подобном функционале недавно также заявили разработчики приложения StrokeViewer (NicoLab, Нидерланды: <https://www.nico-lab.com/strokeviewer/>),



Рис. 1. Интерфейс программы e-CTA. Инструмент Brainomix e-CTA демонстрирует идентификацию и локализацию крупной окклюзии правой средней мозговой артерии, оценку коллатерального статуса и ослабление сигнала от сосудов, тепловую карту коллатерального дефицита (оранжевый) [25]

Fig. 1. e-CTA program interface. Brainomix e-CTA tool demonstrating identification and localization of a large vessel occlusion of the right middle cerebral artery, collateral score and collateral vessel attenuation, and a heat map of the collateral deficit (orange) [25]

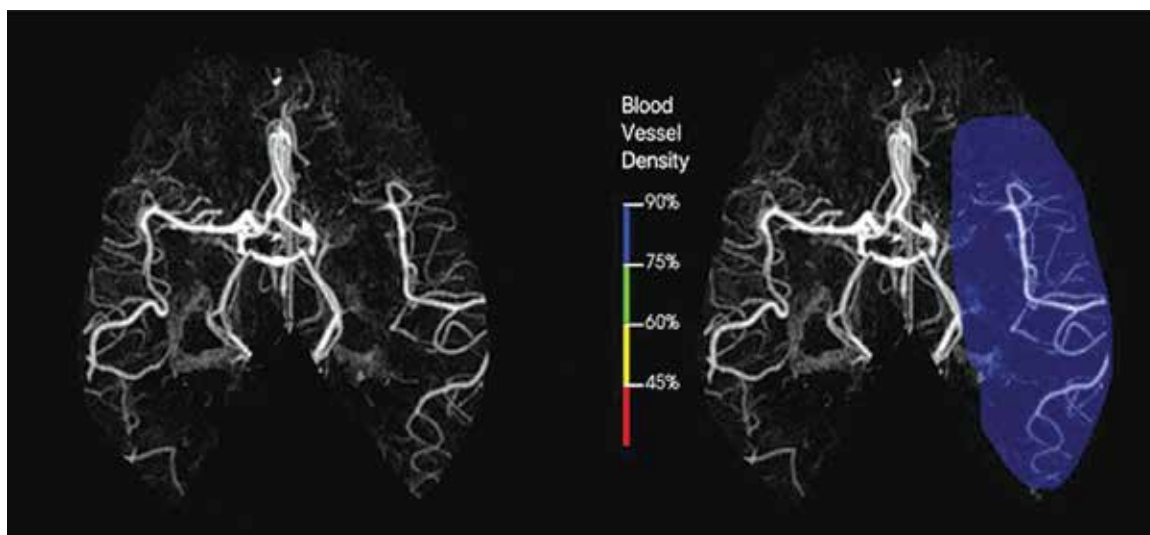


Рис. 2. Интерфейс программы RapidAI (изображение с официального сайта разработчиков: <https://www.rapidai.com/rapid-cta>)

Fig. 2. RapidAI software interface (image from the official site: <https://www.rapidai.com/rapid-cta>)

основу которого сформировали результаты исследования по созданию фильтра «сосудистости» (vesselness) [26]. Применение фильтра позволило сегментировать сосуды на пораженной и интактной стороне и вычислить церебральный коллатеральный статус (qCS) с учетом исходной интенсивности пикселей на КТА. При верификации этой оценки на данных регистра исследования MR Clean показана корреляция 0,68 с 4-балльной шкалой Tan, а в дальнейших исследованиях — с хорошим функциональным исходом через 3 мес после перенесенного ИИ [27].

Во всех программных решениях, упомянутых выше, предусмотрено и автоматическое определение места окклюзии церебральной артерии.

Также немногочисленны и научные работы, не получившие пока коммерческой реализации. В 2020 г. предложен вариант расчета церебрального коллатерального статуса, представляющего комбинацию 4 показателей: объема и длины коллатералей относительно интактной стороны, а также их взвешенные величины, учитывающие интенсивность вокселей [20]. Показано, что точность этого метода оценки сопоставима с точностью специалистов, выполнявших оценку на основе 4-балльной шкалы Тан (269 пациентов). Наилучшей показала себя модель на основе метода случайных лесов, позволяющего определить коллатеральный статус с точностью 80 %. Использование бинарной градации (объединение пациентов с баллами, равными 0 или 1, в одну группу и пациентов с 2 и более баллами во вторую группу) дает точность 90 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка церебрального коллатерального статуса — одна из наиболее важных составляющих при оказании помощи больным с ишемическим инсультом. Данная оценка особенно важна в контексте последних тенденций в изменении клинических протоколов оказания помощи, предусматривающих более широкий временной интервал, в течение которого могут быть проведены реваскуляризирующие вмешательства. Несмотря на упоминание в клинических рекомендациях важности оценки коллатерального кровотока, единое мнение о шкале, наиболее подходящей для этой цели, до сих пор отсутствует.

Применение шкал с большим числом градаций сопряжено с увеличением времени анализа изображений, что может быть фатально для пациента с ишемическим инсультом. Кроме того, такие шкалы характеризуются меньшими показателями межэкспертной надежности и во многом зависят от опыта работы врача-радиолога. Однако и простая бинарная шкала не получила распространения в повседневной рутинной практике написания протоколов компьютерно-томографической ангиографии. В решении проблемы оценки могут помочь разработка и внедрение программ автоматизированной оценки церебрального коллатерального статуса. Они не увеличивают нагрузку на врачей, а наоборот, своевременно дают подсказку и помогают выбрать оптимальную тактику ведения пациента с ишемическим инсультом в остром периоде.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Пирадов М.А., Максимова М.Ю., Танащян М.М. Инсульт. Пошаговая инструкция. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2019. 272 с. [Piradov M.A., Maksimova M.Yu., Tanashyan M.M. Stroke. Step-by-step guidelines. Moscow: GEOTAR-Media, 2019. 272 p. (In Russ.)].
2. Virani S.S., Alonso A., Aparicio H.J. et al. Heart Disease and Stroke Statistics-2021 Update: a report from the American Heart Association. 2021; 143(8):e254–743. DOI:10.1161/CIR.0000000000000950.
3. Национальная ассоциация по борьбе с инсультом, Всероссийское общество неврологов, Ассоциация нейрохирургов России и др. Клинические рекомендации по ведению больных с ишемическим инсультом и транзиторными ишемическими атаками. 2017. 92 с. [National Association for Stroke Prevention, All-Russian Society of Neurologists, Association of Neurosurgeons of Russia et al. Clinical guidelines on management of patients with ischemic stroke and transient ischemic attacks, 2017. 92 p. (In Russ.)].
4. Ассоциация нейрохирургов России, Савелло А.В., Вознюк И.А. и др. Клинические рекомендации. Внутрисосудистое лечение ишемического инсульта в острейшем периоде. Клинические рекомендации. СПб., 2015. 36 с. [Association of Neurosurgeons of Russia, Savello A.V., Voznyuk I.A. et al. Intravascular treatment of ischemic stroke in the acute period. Clinical Guidelines. Saint Petersburg, 2015. 36 p. (In Russ.)].
5. Powers W.J., Rabinstein A.A., Ackerson T. et al. Guidelines for the Early Management of Patients with Acute Ischemic Stroke: 2019 Update to the 2018 Guidelines for the Early Management of Acute Ischemic Stroke: a Guideline for Healthcare Professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. Stroke 2019;50(12):e344–418. DOI: 10.1161/STR.0000000000000211.
6. Liu L., Ding J., Leng X. et al. Guidelines for evaluation and management of cerebral collateral circulation in ischaemic stroke 2017. Stroke Vasc Neurol 2018;3(3):117–30. DOI: 10.1136/svn-2017-000135.
7. Tan I.Y.L., Demchuk A.M., Hopyan J. et al. CT angiography clot burden score and collateral score: correlation with clinical and radiologic outcomes in acute middle cerebral artery infarct. Am J Neuroradiol 2009;30(3):525–31. DOI: 10.3174/ajnr.A1408.
8. Schramm P., Schellinger P.D., Fiebich J.B. et al. Comparison of CT and CT Angiography Source Images with Diffusion-Weighted Imaging in patients with acute stroke within 6 hours after onset. Stroke 2002;33:2426–32. DOI: 10.1161/01.STR.0000032244.03134.37.
9. Tan J.C., Dillon W.P., Liu S. et al. Systematic comparison of perfusion-CT and CT-angiography in acute stroke patients. Ann Neurol 2007;61(6):533–43. DOI: 10.1002/ana.21130.
10. Knauth M., Kummer V., Jansen O., Ha S. Potential of CT angiography in acute ischemic stroke. Am J Neuroradiol 1997;18:1001–10.
11. Wildermuth S., Knauth M., Brandt T. et al. Role of CT angiography in patient selection for thrombolytic therapy in acute hemispheric stroke. Stroke 1998;29(5):935–8. DOI: 10.1161/01.str.29.5.935.
12. Miteff F., Levi C.R., Bateman G.A. et al. The independent predictive utility of computed tomography angiographic collateral status in acute ischaemic stroke. Brain 2009;132(8):2231–8. DOI: 10.1093/brain/awp155.
13. Kim J.J., Fischbein N.J., Lu Y. et al. Regional angiographic grading system for collateral flow: correlation with cerebral infarction in patients with middle cerebral artery occlusion. Stroke 2004;35(6):1340–4. DOI: 10.1161/01.STR.0000126043.83777.3a.
14. Rosenthal E.S., Schwamm L.H., Roccatagliata L. et al. Role of recanalization in acute stroke outcome: rationale for a CT angiogram-based “benefit of recanalization” model. Am J Neuroradiol 2008;29(8):1471–5. DOI: 10.3174/ajnr.A1153.
15. Maas M.B., Lev M.H., Ay H. et al. Collateral vessels on CTA predict outcome in acute ischemic stroke. Stroke 2009;40(9):3001–5. DOI: 10.1161/STROKEAHA.109.552513.Collateral.
16. Menon B.K., Smith E.E., Modi J. et al. Regional leptomeningeal score on CT angiography predicts clinical and imaging outcomes in patients with acute anterior circulation occlusions. Am J Neuroradiol 2011;32(9):1640–5. DOI: 10.3174/ajnr.A2564.
17. Raymond S.B., Schaefer P.W. Imaging brain collaterals: quantification, scoring, and potential significance. Top Magn Reson Imaging 2017;26(2):67–75. DOI: 10.1097/RMR.0000000000000123.
18. Seker F., Potreck A., Mohlenbruch M. et al. Comparison of four different collateral scores in acute ischemic stroke by CT angiography. J Neurointerv Surg 2016;8(11):1116–8. DOI: 10.1136/neurintsurg-2015-012101.
19. Yeo L.L.L., Paliwal P., Teoh H.L. et al. Assessment of intracranial collaterals on CT angiography in anterior circulation acute ischemic stroke. Am J Neuroradiol 2015;36(2):289–94. DOI: 10.3174/ajnr.A4117.
20. Su J., Wolff L., van Es A.C.G.M. et al. Automatic Collateral Scoring From 3D CTA Images. IEEE Trans Med Imaging 2020;39(6):2190–200. DOI: 10.1109/TMI.2020.2966921.
21. Молохоев Е.Б., Закарян Н.В., Шелеско А.А. и др. Результаты эндоваскулярного лечения ишемического инсульта в зависимости от степени коллатерального кровотока головного мозга. В кн.: XXV Всероссийский съезд сердечно-сосудистых хирургов. 2019. [Molokhoev E.B., Zakaryan N.V., Shelesko A.A. et al. Results of endovascular treatment of ischemic stroke depending on the level of cerebral collateral circulation. In: XXV All-Russian Congress of Cardiovascular Surgeons, 2019. (In Russ.)].
22. Zaidat O.O., Yoo A.J., Khatri P. et al. Recommendations on angiographic revascularization grading standards for acute ischemic stroke: a consensus statement. Stroke 2013;44(9):2650–63. DOI: 10.1161/STROKEAHA.113.001972.
23. Grunwald I.Q., Kulikovskiy J., Reith W. Collateral automation for triage in stroke: evaluating automated scoring of collaterals in acute stroke on computed tomography scans. Cerebrovasc Dis 2019;47(56):217–22. DOI: 10.1159/000500076.
24. Pfaff J., Seker F., Nagel S. et al. Evaluation of intracranial collaterals by a fully automated computer based algorithm compared to human readers. Eur Stroke J 2018;3(1 Suppl):77–8.
25. Soun J.E., Chow D.S., Nagamine M. et al. Artificial intelligence and acute stroke imaging. Am J Neuroradiol 2021;42(1):2–11. DOI: 10.3174/ajnr.A6883.
26. Boers AMM, Barros RS, Jansen IGH. et al. Quantitative collateral grading on CT angiography in patients with acute ischemic stroke. In: Molecular Imaging, Reconstruction and Analysis of Moving Body Organs, and Stroke Imaging and Treatment: 5th International Workshop, CMMI 2017 2nd International Workshop, RAMBO 2017 and 1st International Workshop, SWITCH 2017 Held in Conjunction with MICCAI 2017, Proceedings. 2017;10555:176–84. DOI: 10.1007/978-3-319-67564-0_18.
27. Boers A.M.M., Barros R.S., Jansen I.G.H. et al. Value of quantitative collateral scoring on CT angiography in patients with acute ischemic stroke. Am J Neuroradiol. 2018;39(6):1074–82. DOI: 10.3174/ajnr.A5623.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

Acknowledgment. This work was supported by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University "Photonic and Quantum technologies. Digital medicine".

Вклад авторов

Д.Д. Долотова: разработка концепции и дизайна исследования, сбор и обработка материала, написание статьи;

Е.Р. Благосклонова: сбор и обработка материала;

Г.Р. Рамазанов: научное редактирование статьи;

И.В. Архипов: анализ программного обеспечения, графическое представление;

С.С. Петриков: финальное научное редактирование статьи;

А.В. Гаврилов: финальное научное редактирование статьи, научное руководство.

Authors' contributions

D.D. Dolotova: research idea and design of the study, obtaining data for analysis, article writing;

E.R. Blagosklonova: obtaining data for analysis;

G.R. Ramazanov: scientific editing of the article;

I.V. Arkhipov: software analysis, graphical representation;

S.S. Petrikov: final scientific editing of the article;

A.V. Gavrilov: final scientific editing of the article, scientific leadership.

ORCID авторов / ORCID of authors

Д.Д. Долотова / D.D. Dolotova: <https://orcid.org/0000-0002-5538-1109>

Е.Р. Благосклонова / E.R. Blagosklonova: <https://orcid.org/0000-0002-4678-060X>

Г.Р. Рамазанов / G.R. Ramazanov: <https://orcid.org/0000-0001-6824-4114>

И.В. Архипов / I.V. Arkhipov: <https://orcid.org/0000-0003-4278-2285>

С.С. Петриков / S.S. Petrikov: <https://orcid.org/0000-0003-3292-8789>

А.В. Гаврилов / A.V. Gavrilov: <https://orcid.org/0000-0002-7838-584X>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-29-26007 (мк).

Financing. The study was supported by the grant from the Russian Foundation of Basic Research No. 18-29-26007 (мк).