

Grading Carotid Stenosis Using Ultrasonic Methods

Gerhard-Michael von Reutern, Michael-Wolfgang Goertler, Natan M. Bornstein, Massimo Del Sette, David H. Evans, Michael-Wolfgang Goertler, Andreas Hetzel, Manfred Kaps, Fabienne Perren, Alexander Razumovsky, Toshiyuki Shiogai, Ekaterina Titianova, Pavel Traubner, Narayanaswamy Venketasubramanian, Lawrence K.S. Wong and Masahiro Yasaka

Stroke. 2012;43:916-921; originally published online February 16, 2012;

doi: 10.1161/STROKEAHA.111.636084

Stroke is published by the American Heart Association, 7272 Greenville Avenue, Dallas, TX 75231

Copyright © 2012 American Heart Association, Inc. All rights reserved.

Print ISSN: 0039-2499. Online ISSN: 1524-4628

The online version of this article, along with updated information and services, is located on the World Wide Web at:

<http://stroke.ahajournals.org/content/43/3/916>

An erratum has been published regarding this article. Please see the attached page for:

<http://stroke.ahajournals.org/content/43/5/e54.full.pdf>

Data Supplement (unedited) at:

<http://stroke.ahajournals.org/content/suppl/2012/08/15/STROKEAHA.111.636084.DC1.html>

<http://stroke.ahajournals.org/content/suppl/2013/10/08/STROKEAHA.111.636084.DC2.html>

Permissions: Requests for permissions to reproduce figures, tables, or portions of articles originally published in *Stroke* can be obtained via RightsLink, a service of the Copyright Clearance Center, not the Editorial Office. Once the online version of the published article for which permission is being requested is located, click Request Permissions in the middle column of the Web page under Services. Further information about this process is available in the [Permissions and Rights Question and Answer](#) document.

Reprints: Information about reprints can be found online at:

<http://www.lww.com/reprints>

Subscriptions: Information about subscribing to *Stroke* is online at:

<http://stroke.ahajournals.org/subscriptions/>

Grading Carotid Stenosis Using Ultrasonic Methods

Gerhard-Michael von Reutern, MD, PhD; Michael-Wolfgang Goertler, MD, PhD; Natan M. Bornstein, MD; Massimo Del Sette, MD; David H. Evans, PhD, DSc; Andreas Hetzel, MD, PhD; Manfred Kaps, MD, PhD; Fabienne Perren, MD, PhD; Alexander Razumovsky, PhD; Toshiyuki Shiogai, MD, PhD; Ekaterina Titianova, MD, PhD, DSc; Pavel Traubner, MD, PhD; Narayanaswamy Venketasubramanian, MD; Lawrence K.S. Wong, MD; Masahiro Yasaka, MD, PhD; on behalf of the Neurosonology Research Group of the World Federation of Neurology

Abstract—The controversy as to whether Doppler ultrasonic methods should play a role in clinical decision-making in the prevention of stroke is attributable to reported disagreement between angiographic and ultrasonic results and the lack of internationally accepted ultrasound criteria for describing the degree of stenosis. Foremost among the explanations for both is the broad scatter of peak systolic velocities in the stenosis, the criterion that has so far received most attention. Grading based on a set of main and additional criteria can overcome diagnostic errors. Morphological measurements (B-mode images and color flow imaging) are the main criteria for low and moderate degrees of stenosis. Increased velocities in the stenosis indicate narrowing, but the appearance of collateral flow and decreased poststenotic flow velocity prove a high degree stenosis ($\geq 70\%$), additionally allowing the estimation of the hemodynamic effect in the category of high-degree stenosis. Additional criteria refer to the effect of a stenosis on prestenotic flow (common carotid artery), the extent of poststenotic flow disturbances, and derived velocity criteria (diastolic peak velocity and the carotid ratio). This multiparametric approach is intended to increase the reliability and the standard of reporting of ultrasonic results for arteriosclerotic disease of the carotid artery. (*Stroke*. 2012;43:916-921.)

Key Words: carotid stenosis ■ degree of stenosis ■ duplex sonography ■ peak systolic velocity
■ transcranial sonography ■ ultrasound diagnosis

See editorial, p 627.

Since the early days of Doppler sonography, a continuous discussion has been taking place about the reliability of Doppler sonography and latterly duplex sonography to determine the degree of an internal carotid artery stenosis. Later, the evidence for a beneficial effect of carotid surgery closely depending on the degree of stenosis^{1,2} became the driving force in prolonging the controversy.³⁻⁶ There has been a steady improvement in B-mode imaging and new modalities (eg, color flow, B-flow) have been added. However, conventional X-ray angiography is less frequently used because of its risk, but progress has been achieved with MR and CT imaging. Furthermore a general statement about the reliability of Doppler ultrasound is difficult because there is no universally accepted set of criteria to measure the degree of stenosis and there is no consensus about the relative weight of different criteria. As a consequence, the role of ultrasonic methods for decision-making is underappreciated. For example, in a recent scientific statement of the American Heart Association,⁷ “carotid ultrasound” for detecting surgical le-

sions was classified as a screening tool not adequate to be used as the sole methodology for the definitive diagnosis. Some large trials, however, have used carotid ultrasound as the diagnostic method for selection of patients for carotid surgery or stenting.^{8,9} In addition, the American Heart Association guidelines for primary prevention of stroke include Doppler ultrasound as a selection criterion for carotid endarterectomy.¹⁰

The aim of this article is to summarize the internationally available experience with ultrasonic grading of carotid stenosis, including a recent consensus published in German¹¹ and approved by all German medical societies active in the field of carotid ultrasound.

The Underlying Pathology

The pathogenetic substrate of stroke attributable to carotid pathology is a plaque that causes hemodynamic effects attributable to area reduction and a complicated structure and surface eventually creating emboli or occlusion. Area reduction by a stenosis, not diameter reduction, is the anatomic

Received August 12, 2011; accepted November 15, 2011.

From the Neurologische Praxis am Ambulanten Kardiologischen Zentrum (G.M.R.), Bad Nauheim, Germany; Klinik für Neurologie (M.W.G.), Universität Magdeburg, Magdeburg, Germany; and Neurosonology Research Group of the World Federation of Neurology (N.M.B., M.D.S., D.H.E., M.-W.G., A.H., M.K., F.P., A.R., M.v.R., T.S., E.T., P.T., N.V., L.K.S.W., M.Y.).

On behalf of the Neurosonology Research Group of the World Federation of Neurology.

Correspondence to Gerhard-Michael von Reutern, MD, PhD; Lassallestrasse 3, 61231 Bad Nauheim, Germany. E-mail g.v.reutern@gmx.de

© 2012 American Heart Association, Inc.

Stroke is available at <http://stroke.ahajournals.org>

DOI: 10.1161/STROKEAHA.111.636084

parameter for the hemodynamic effect and the measured flow velocities. Therefore, diameter reduction alone is insufficient to evaluate the degree of stenosis, especially irregular ones. Doppler ultrasound and X-ray (or MR, CT) angiography each measure different biological variables and total agreement is impossible. Plaque composition, plaque vascularization, thickness of the cap, plaque ulceration, and plaque motion are further prognostic factors not included in this article because there is no established evidence for decision-making based on these findings.

Assessment of Morphology

Ultrasound B-mode is presently the best method for demonstrating arterial wall thickness and minor plaques, providing images of the wall itself and not only from the blood column. In addition, moderate disease can be imaged in longitudinal and cross sectional planes. In severe disease, cross-sectional B-mode images are more difficult to generate because of shadowing and other artifacts. The same is true for color flow. Therefore, the more severe a stenosis, the more hemodynamic criteria are prevailing. The relationship between area and diameter reduction depends on the type of stenosis, ie, whether it is concentric or eccentric. The latter is frequent if the plaque grows opposite to the flow divider. In this case, diameter and area reduction are similar; however, in concentric narrowing, degree of stenosis measured in percentage area reduction is higher than the measured diameter reduction.¹² Often the lumen is not circular (concentric) or semi-circular (eccentric), but rather kidney-shape or completely irregular. Despite these limitations, diameter reduction as shown by X-ray angiography is widely considered to be the gold standard for decision-making because this was the method chosen for NASCET¹ and ECST² in the 1980s.¹³ Because of the enlargement of the carotid bulb, it is necessary to define the type of measurement after the ECST (local diameter narrowing with the original diameter at the level of stenosis as the denominator) or the NASCET study (with the diameter distal to the bulb as denominator).¹⁴ Local diameter narrowing better-illustrates plaque burdening. The narrowing related to the distal diameter corresponds better to the hemodynamic effect and is preferred by radiologists and in existing guidelines for clinical decisions. Another concern is that with a severe stenosis, poststenotic flow volume diminishes and in consequence the diameter of the distal segment "collapses," which leads to a lower calculated degree of stenosis. Therefore, the NASCET criterion should not be applied in this condition.¹⁵ Both the NASCET and ECST types of measurement are feasible with B-mode imaging if it is possible to visualize the residual lumen of the stenosis and the lumen of the poststenotic segment. Color flow imaging alone is less reliable for taking diameter or area measurements because of the influence of the gain setting.

Assessment of the Hemodynamic Effect

Arterial narrowing leads to locally increased velocities. A hemodynamic effect is reached when pressure and flow volume are diminished in the poststenotic segment. This effect is clinically important because the probability of

having a complicated plaque structure prone to embolism is higher in this situation. In addition, there is the risk of ischemia because of an insufficient blood supply. Flow velocity as measured by means of Doppler sonography correlates with the narrowing measured in area reduction. The correlation of velocity and the degree of stenosis is demonstrated by the "Spencer's curve."^{12,16} Numerous articles have examined the accuracy and reliability of this criterion for grading stenosis and, consequently, it has become a worldwide accepted criterion for grading.¹⁷⁻¹⁹ However, all published correlations of X-ray angiography and peak systolic velocity (PSV) in the stenosis show considerable scattering of results.²⁰⁻²⁴ This was the background for not accepting Duplex sonography as the sole methodology for definitive diagnosis by the American Heart Association.^{5,7} There are many reasons why this criterion, whatever threshold is used, is frequently in disagreement with the angiographic result and is of limited value taken alone. First, there is the morphology of the stenosis as discussed (area versus diameter, irregularities ill-represented by all imaging modalities).

Second, there is ambiguity of the "Spencer's curve," with the possibility of the same velocity in a moderate stenosis and a nearly occluded artery.^{12,25} Velocity in a stenosis increases with increasing degree of stenosis but decreases in situations near occlusion.

Third, there are errors and different conventions in measuring the angle of insonation needed for converting recorded Doppler frequencies into velocities.²⁶ Because of the cosine function of the angle in the Doppler equation, the possible error is greater the greater the angle. The angle can be estimated fairly well in laminar flow conditions but it is difficult with disturbed flow, where stream lines differ from the vessel course. Helical organization of poststenotic disturbed flow (or because of vessel curvature) can lead to overestimation of velocities because of incorrect estimation of the angle, even using color flow imaging as a guide. Two-dimensional color flow imaging is not able to reliably visualize the orientation of flow streams in 3 dimensions in disturbed flow. Finally the ill-defined procedure on how to correct for the angle of insonation in the case of a stenosis may vary systematically from laboratory to laboratory and adds to the problem of relying on recommended thresholds of velocities.

Fourth, there is the influence of collateral flow. Velocities in a stenosis depend on collateral flow toward the territory supplied by the stenosed artery. Collateral flow via the circle of Willis and less effectively via the ophthalmic artery is only present in a hemodynamically significant stenosis. The higher the capacity of this collateral network, the less the poststenotic pressure decrease and, consequently, the intrastenotic velocity.²⁷ Because there is a considerable variation of the circle of Willis, its influence on the PSV is different from patient to patient. The same holds true for the PSV contralateral to an internal carotid artery occlusion.²⁸

Fifth, there is the technical problems of spectrum analysis. The Doppler spectrum generated by a short stenosis is typically composed by high-frequency (velocity) components representing the jet, and low-frequency ones attributable to vortices and flow separation. The relative weight of the

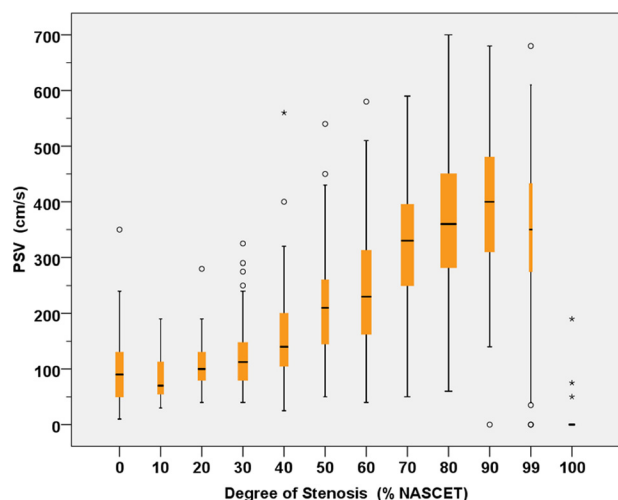


Figure. Box plot chart of peak systolic velocity (PSV; cm/s) vs NASCET degree of stenosis (%) for 977 stenoses from 5 studies.^{20–24} The plot shows median PSV, 25% to 75% (boxes), and 0% to 100% interquartile range (T-bars), except outliers (circles) and extreme values (stars). Paired PSV and NASCET values for the 977 stenoses have been derived from the original graphic scatter plots by means of grid lines for the PSV (10 cm/s distance) and NASCET degree of stenosis (1% distance) after 4-fold magnification. The 10% NASCET classes included PSV of maximally 5% below and 4% above the class value, eg, from 55% to 64% for the 60% class. Overall, 977 of 1106 (88%) pairs could be reconstructed. The majority of missed pairs (because of identical values or clustering with insufficient graphical resolution) occurred at 0% and <30% NASCET degree of stenosis and therefore should not be allowed to bias the clinical use of these data.

high-frequency components can be so low that they will not be displayed without special high-pass filtering or setting of the gain. This can lead to underestimation of the PSV.²⁹

Taking into consideration all these factors, it seems evident that PSV as a single simplified diagnostic parameter is insufficient. Even with average PSV values for a given degree of stenosis derived from nearly 980 patients from 5 studies (Figure),^{20–24} scattering virtually prevents reliable quantification of percent of NASCET stenosis based on PSV alone, whatever threshold is recommended. The average PSV value and the distribution of PSV values across the scatter range for a given degree of stenosis should be considered in addition to the threshold value. In combination with further criteria (Table), it is possible to decide whether a measured PSV represents a less or more severe stenosis within the scatter range.

Main and Additional Criteria

With the existing set of ultrasonic parameters, it is important to use them with their relative weight (Table).¹¹ The main criteria represent essential morphological and hemodynamic information. The relative value among them depends on the severity of stenosis, eg, B-mode imaging is more relevant than velocity values in low-degree disease. However, presence of collateral flow is a stronger indicator for a severe stenosis than PSV.^{18,29} Additional criteria are supporting elements, generally more difficult to quantify. The amount of flow disturbances as demonstrated by the spectral wave form

(spectral broadening and bidirectional flow signals) depends on the degree of stenosis. It increases with increasing severity and PSV but decreases again with a very tight stenosis. The same holds true for the length of the flow field with disturbances. Side-to-side differences of common carotid artery velocities are present in occlusion of the internal carotid artery or severe stenosis but are less reliable for the differentiation between 60% and 70% stenoses.

During a complete neurosonologic examination of a patient with internal carotid artery stenosis, multiple useful observations will be made concerning all attributes listed in the Table. The question is regarding what their value is for grading the stenosis, for example, color flow imaging shows a clear narrowing in case of a hemodynamically relevant stenosis; however, the value for directly measuring the degree of stenosis is low. But it helps to localize the stenosis.

Advantages of a Multiparametric Approach

Diagnostic ultrasound offers the possibility of using both morphological and hemodynamic criteria. In the following, the main steps of grading are described (percentages are approximations; Figure).

Low-Degree Stenosis 0% to 40% (NASCET)

This is the domain of B-mode imaging in the longitudinal and cross-sectional planes. Velocity measurement rules out a more severe stenosis sometimes suggested by an inappropriate sectional plane. It is recommended to measure, in addition to the reduction of diameter in percent, the thickness and length of the plaque as well as the residual lumen.

Moderate Stenosis 50% to 60% (NASCET)

This is a class of stenosis in which local increase of velocity, color flow, and B-mode imaging can be combined for grading. PSV is, in general, <230 cm/s. Collateral flow is not present.

Hemodynamically Relevant Stenosis $\geq 70%$ (NASCET)

This is the domain of combined hemodynamic criteria, such as increased PSV or end-diastolic velocity or the “carotid ratio” (ratio of internal to common carotid PSV), but there is a considerable overlap with moderate stenoses. Collateral flow is demonstrated by examining the ophthalmic artery branches (Doppler ophthalmic test), the anterior cerebral artery, proving cross-flow or the P1 segment of the posterior cerebral artery, indicating collateral flow through the posterior communicating artery. In case of established collateral flow, hemodynamic relevance of the stenosis is proven and it can be classified as high-degree ($\geq 70%$ NASCET irrespective of the intrastenotic PSV).²⁹ Poststenotic flow velocity in the segment distal to the disturbed flow field is another criterion. In case of a clear reduction of signal pulsatility and poststenotic velocity (eg, <30 cm/s PSV), the diameter reduction is $\approx 90%$ and the residual lumen is <1 mm irrespective of the PSV in the stenosis. The degree of reduction of poststenotic flow velocity (as a result of reduced flow volume) helps to differentiate between 70% (severe) and 80% to 90% (very severe) stenosis, a differentiation not

Table. Combined Criteria for Grading Internal Carotid Stenosis

Degree of Stenosis as Defined by NASCET (%)	Grading of Internal Carotid Stenosis						
	10–40	50	60	70	80	90	Occlusion
Main criteria							
1. B-mode image, diameter	Applicable	Possibly applicable					Imaging of occluded artery
2. Color Doppler image	Plaque delineation	Flow	Flow	Flow	Flow	Flow	Absence of flow
3. PSV threshold (cm/s)		125		230		NA	NA
4a. PSV average (cm/s)	≤160	210	240	330	370	Variable	NA
4b. PSV poststenotic (cm/s)				≥50	<50	<30	NA
5. Collateral flow (periorbital arteries or circle of Willis)				Possible	Present	Present	Present
Additional criteria							
6. Prestenotic flow (diastole) (CCA)				Possibly reduced	Reduced	Reduced	Reduced
7. Poststenotic flow disturbances (severity and length)		Moderate	Pronounced	Pronounced	Pronounced	Variable	NA
8. End-diastolic flow velocity in the stenosis (cm/s)			<100	>100		Variable	NA
9. Carotid ratio ICA/CCA	<2	≥2	≥2	>4	>4	Variable	NA

These criteria do not apply for external carotid stenosis. Note the hierarchical order of main and additional criteria and the change of reliability of each criterion for different degrees of stenosis. Examples how to use this Table are given in the text under “Main and Additional Criteria” and “Advantages of a Multiparametric Approach.” For definition of classes of stenosis, see Figure legend.

Criterion 1: Visualization of the ICA by B-mode imaging is needed to prove no flow.

Criterion 4a: Values taken from Figure.

Criterion 4b: Poststenotic indicates measured distal to turbulences. In case of a short neck or a bifurcation in high position, respectively, these criteria are difficult to assess with a conventional duplex technique. Then, a lateral scan head position behind the jaw angle or a scan head with a lower frequency, as for abdominal examinations, may give access to the more distal lying segments of the ICA. Another possibility is the examination of the distal ICA with 2-MHz pulsed Doppler sonography.

Criterion 6: “Reduced” means side-to-side difference, mainly in diastolic velocity.

Modified from reference 11.

CCA indicates common carotid artery; ICA, internal carotid artery; NA, not applicable; PSV, peak systolic velocity.

possible based only on PSV values. A comparison with the unaffected contralateral internal carotid artery is helpful to appreciate poststenotic flow reduction. Color flow imaging is important as a guide for velocity measurement and is essential for differentiating occlusion from stenosis. B-mode imaging is only of exceptionally sufficient quality to add essential information for grading severe stenoses.

Grading in Multiple Steps or Dichotomized in ≥70% or <70%?

In everyday practice of digital subtraction angiography a stenosis is quantified in 10% steps, whether measured with calipers or just by “eyeballing.” Similar steps can be described by taking into account the ultrasonic criteria as described. A comparison between digital subtraction angiography and ultrasonic methods using such small steps will always result in discrepancies because of limitations of both methods. However, statistics yield smaller CI comparing 2 large groups using a single threshold value. That is, however, not the question in the clinical situation. A very severe stenosis most likely will be classified by all methods as a severe one and a low-degree stenosis will be classified as low. However, in the case of a stenosis classified by one method as 50% and the other as 70%, the question is again the same: Is

grading in smaller steps reliable? Which method shall we use for decision-making? The multiparametric ultrasonic approach helps to avoid misclassifications. The shift of relevance of criteria from B-mode image to velocity and hemodynamic parameters with increasing severity of a stenosis make it possible to describe entities with real physiological differences. Is there collateral flow or the reduction of poststenotic flow velocity (and vessel diameter), and to what extent? Therefore, the resulting ultrasonic description of degrees of stenosis does not represent pseudoprecision. In the category of severe stenosis, poststenotic reduced velocity can describe different hemodynamic effects¹² with possible prognostic implications.^{30,31}

Level of Competence

Of course, it is justifiable to use ultrasound purely as a screening method if advanced experience and equipment is not available. It may be sufficient to differentiate between clearly normal and pathological results and to add other diagnostic modalities. This has to be seen not only against a technical background but also against a clinical one. The crescendo transient ischemic attack needs a faster and more definite assessment than a doubtful symptom 1 month ago. Any discussion about clinical decision-making should be

addressed in the framework of the 3 levels of training and competence (basic, expert, scientific, and teaching) as defined by the EFSUMB (<http://www.efsumb.org/guidelines/2009-04-14apx8.pdf>) or corresponding national definitions.

Recommendations

The NASCET method of measuring a stenosis should be the standard; the local narrowing (ECST) can be measured in addition, but it must be declared as such. This will avoid confusion. Grading of carotid stenosis by diagnostic ultrasound should be primarily based on morphological information (B-mode, color flow, or B-flow imaging) in low to moderate degrees of stenosis. In addition to degree of narrowing, plaque thickness, plaque length, and residual lumen should be reported.

Velocity measurements in a stenosis (PSV and carotid ratio) alone are not sufficient to differentiate a moderate from a severe ($\geq 70\%$ NASCET) stenosis with sufficient clinical reliability. It is recommended that, in addition, a search for collateral flow is made in the ophthalmic artery branches (continuous wave [CW] Doppler) or the anterior cerebral artery (transcranial Doppler or color-coded duplex sonography). Furthermore, it is recommended that the poststenotic flow velocity distal to flow disturbances is examined, in which a reduction of velocities (comparison with the unaffected contralateral side or absolute reduction) allows additional grading within the category of severe stenosis.

Hemodynamic criteria are appropriate for grading moderate to severe stenoses. Criteria should be considered in a hierarchical order. Established collateral flow is the most powerful criterion, excluding a less than severe stenosis irrespective of PSV.

Special care is recommended for converting Doppler frequencies into velocity by measuring the angle of incidence (Doppler angle). Measurements should be taken using the lowest possible angle of insonation and made in relation to the direction of the jet visualized by color velocity flow and not the vessel course. With an irregular stenosis, overestimation of velocities attributable to disturbed or helical flow has to be taken into consideration.

The Clinical Value of Doppler Ultrasound

These recommendations are aimed at standardizing the criteria for grading carotid stenosis. Some published guidelines do not include such a set of criteria as recommended in this article. As a consequence, the role of ultrasonic methods has been underappreciated. The statement of the American Heart Association⁷ denying a role of diagnostic ultrasound beyond screening is based on a literature review including many studies using as the sole criterion the “peak systolic velocity,” a criterion with serious limitations as explained. In addition, this statement neglects the possibilities of severe angiographic misclassification because of sectional plane artifacts in a moderate to severe stenosis or in completely irregular ones. If ultrasound is used instead of X-ray angiography for decision-making against such “evidence-based guidelines,” then the requirements of certified experience including continuous self-assessment and extensive documentation are

high. Any decision based only on a carotid scan at the neck level and a single velocity value does not meet the requirements. Diagnostic ultrasound has the potential to classify and grade carotid disease with high reliability, taking into account morphological and complex hemodynamic parameters. These parameters represent physiological variables correlating with prognosis.

Disclosures

None.

References

1. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial (NASCET) Collaborators. Beneficial effect of carotid endarterectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis. *N Engl J Med.* 1991;325:445–453.
2. European Carotid Surgery Trialists' Collaborative Group. MRC European Carotid Surgery Trial: interim results for symptomatic patients with severe (70–99%) or with mild (0–29%) carotid stenosis. *Lancet.* 1991;337:1235–1243.
3. Eliasziw M, Rankin RN, Fox AJ, Haynes RB, Barnett HJ. Accuracy and prognostic consequences of ultrasonography in identifying severe carotid artery stenosis. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial (NASCET) Group. *Stroke.* 1995;26:1747–1752.
4. Ringelstein EB. Skepticism toward carotid ultrasonography. A virtue, an attitude, or fanaticism? *Stroke.* 1995;26:1743–1746.
5. Barnett HJ, Warlow CP. Carotid endarterectomy and the measurement of stenosis. *Stroke.* 1993;24:1281–1284.
6. Wardlaw JM, Chappell FM, Best JJ, Wartolowska K, Berry E, NHS Research and Development Health Technology Assessment Carotid Stenosis Group. Non-invasive imaging compared with intra-arterial angiography in the diagnosis of symptomatic carotid stenosis: a meta-analysis. *Lancet.* 2006;367:1503–1512.
7. Latchaw RE, Alberts MJ, Lev MH, Connors JJ, Harbaugh RE, Higashida RT, et al. Recommendations for imaging of acute ischemic stroke: a scientific statement from the American Heart Association. *Stroke.* 2009;40:3646–3678.
8. GALA Trial Collaborative Group, Lewis SC, Warlow CP, Bodenham AR, Colam B, Rothwell PM, et al. General anaesthesia versus local anaesthesia for carotid surgery (GALA): a multicentre, randomised controlled trial. *Lancet.* 2008;372:2132–2142.
9. SPACE Collaborative Group, Ringleb PA, Allenberg J, Bruckmann H, Eckstein HH, Fraedrich G, et al. 30 day results from the SPACE trial of stent-protected angioplasty versus carotid endarterectomy in symptomatic patients: a randomised non-inferiority trial. *Lancet.* 2006;368:1239–1247.
10. Goldstein LB, Bushnell CD, Adams RJ, Appel LJ, Braun LT, Chaturvedi S, et al. Guidelines for the primary prevention of stroke: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke.* 2011;42:517–584.
11. Arning C, Widder B, von Reutern GM, Stiegler H, Gortler M. [Revision of DEGUM ultrasound criteria for grading internal carotid artery stenoses and transfer to NASCET measurement]. *Ultraschall Med.* 2010;31:251–257.
12. Spencer MP, Reid JM. Quantitation of carotid stenosis with continuous-wave (C-W) Doppler ultrasound. *Stroke.* 1979;10:326–330.
13. Rothwell PM, Gibson RJ, Slattery J, Sellar RJ, Warlow CP. Equivalence of measurements of carotid stenosis. A comparison of three methods on 1001 angiograms. European Carotid Surgery Trialists' Collaborative Group. *Stroke.* 1994;25:2435–2439.
14. Widder B, von Reutern GM, Neuerburg-Heusler D. [Morphologic and Doppler sonographic criteria for determining the degree of stenosis of the internal carotid artery]. *Ultraschall Med.* 1986;7:70–75.
15. Rothwell PM, Warlow CP. Low risk of ischemic stroke in patients with reduced internal carotid artery lumen diameter distal to severe symptomatic carotid stenosis. Cerebral protection due to low poststenotic flow? On behalf of the European Carotid Surgery Trialists' Collaborative Group. *Stroke.* 2000;31:622–630.
16. Alexandrov AV. The Spencer's Curve: clinical implications of a classic hemodynamic model. *J Neuroimaging.* 2007;17:6–10.

17. Alexandrov AV, Bladin CF, Maggisano R, Norris JW. Measuring carotid stenosis. Time for a reappraisal. *Stroke*. 1993;24:1292–1296.
18. de Bray JM, Glatt B. Quantification of atheromatous stenosis in the extracranial internal carotid artery. *Cerebrovasc Dis*. 1995;5:414–426.
19. Grant EG, Benson CB, Moneta GL, Alexandrov AV, Baker JD, Bluth EI, et al. Carotid artery stenosis: gray-scale and Doppler US diagnosis—Society of Radiologists in Ultrasound Consensus Conference. *Radiology*. 2003;229:340–346.
20. Fillingim MF, Baker RJ Jr, Zwolak RM, Musson A, Lenz JE, Mott J, et al. Carotid duplex criteria for a 60% or greater angiographic stenosis: variation according to equipment. *J Vasc Surg*. 1996;24:856–864.
21. Hunink MG, Polak JF, Barlan MM, O’Leary DH. Detection and quantification of carotid artery stenosis: efficacy of various Doppler velocity parameters. *AJR Am J Roentgenol*. 1993;160:619–625.
22. Koga M, Kimura K, Minematsu K, Yamaguchi T. Diagnosis of internal carotid artery stenosis greater than 70% with power Doppler duplex sonography. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2001;22:413–417.
23. Moneta GL, Edwards JM, Papanicolaou G, Hatsukami T, Taylor LM Jr, Strandness DE Jr, et al. Screening for asymptomatic internal carotid artery stenosis: duplex criteria for discriminating 60% to 99% stenosis. *J Vasc Surg*. 1995;21:989–994.
24. Neschis DG, Lexa FJ, Davis JT, Carpenter JP. Duplex criteria for determination of 50% or greater carotid stenosis. *J Ultrasound Med*. 2001;20:207–215.
25. Kaps M, von Reutern GM, Stolz E, von Büdingen HJ, eds. *Ultraschall in der Neurologie*, II ed. Stuttgart, New York: Thieme; 2005.
26. Phillips DJ, Beach KW, Primozich J, Strandness DE Jr. Should results of ultrasound Doppler studies be reported in units of frequency or velocity? *Ultrasound Med Biol*. 1989;15:205–212.
27. Spencer MP. Hemodynamics of arterial stenosis. In: Spencer MP, eds. *Ultrasonic diagnosis of cerebrovascular disease*. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers; 1987.
28. Henderson RD, Steinman DA, Eliasziw M, Barnett HJ. Effect of contralateral carotid artery stenosis on carotid ultrasound velocity measurements. *Stroke*. 2000;31:2636–2640.
29. Reutern, GM von. Von Büdingen, HJ, eds. *Ultrasound diagnosis of cerebrovascular disease*. Stuttgart, New York: Thieme; 1993.
30. Blaser T, Hofmann K, Buerger T, Effenberg O, Wallesch CW, Goertler M. Risk of stroke, transient ischemic attack, and vessel occlusion before endarterectomy in patients with symptomatic severe carotid stenosis. *Stroke*. 2002;33:1057–1062.
31. Goertler M, Blaser T, Guhr S, Lotze H, Heisinger J, Kropf S, et al. Reduced frequency of embolic signals in severe carotid stenosis with poststenotic flow velocity reduction. *Cerebrovasc Dis*. 2005;19:229–233.

Correction

The article entitled, “Grading Carotid Stenosis Using Ultrasonic Methods,” by von Reutern et al, which published in the March 2012 issue of the journal (*Stroke*. 2012;43:916–921), included an error in the running head of the article (on pages 917, 919, and 921). The running head should be: “Grading Carotid Stenosis” Also, in the author’s list Dr von Reutern’s name appeared twice. Dr von Reutern is the first author. These errors have been corrected in the online version of the article and Table of Contents.

Determinación del grado de estenosis carotídea con métodos ecográficos

Gerhard-Michael von Reutern, MD, PhD; Michael-Wolfgang Goertler, MD, PhD;
Natan M. Bornstein, MD; Massimo Del Sette, MD; David H. Evans, PhD, DSc; Andreas Hetzel, MD, PhD;
Manfred Kaps, MD, PhD; Fabienne Perren, MD, PhD; Alexander Razumovsky, PhD;
Michael von Reutern, MD, PhD; Toshiyuki Shiogai, MD, PhD; Ekaterina Titianova, MD, PhD, DSc;
Pavel Traubner, MD, PhD; Narayanaswamy Venketasubramanian, MD; Lawrence K.S. Wong, MD;
Masahiro Yasaka, MD, PhD; en nombre del Neurosonology Research Group de la World
Federation of Neurology

Resumen—La controversia existente respecto a si los métodos de ecografía Doppler deben desempeñar un papel en la toma de decisiones clínicas para la prevención del ictus puede atribuirse a las discrepancias que se han descrito entre los resultados angiográficos y los ecográficos y a la falta de unos criterios ecográficos aceptados internacionalmente para describir el grado de estenosis. Entre las posibles explicaciones de ambos factores destaca la gran dispersión de los valores de velocidad sistólica máxima en la estenosis, que es el criterio al que hasta el momento se ha prestado más atención. Los grados establecidos mediante un conjunto de criterios principales y adicionales pueden permitir superar los errores diagnósticos. Las mediciones morfológicas (imágenes en modo B e imágenes de flujo a color) son los criterios principales para los grados bajo y moderado de estenosis. El aumento de las velocidades en la estenosis indica una reducción del diámetro, pero la aparición de un flujo colateral y la disminución de la velocidad del flujo postestenótico demuestran la presencia de una estenosis de grado alto ($\geq 70\%$), y permiten además una estimación del efecto hemodinámico en la categoría de estenosis de grado alto. Otros criterios adicionales hacen referencia al efecto de una estenosis sobre el flujo preestenótico (arteria carótida común), la magnitud de las alteraciones del flujo postestenóticas y los criterios de velocidad derivados (velocidad máxima diastólica y cociente carotídeo). Este enfoque con múltiples parámetros pretende aumentar la fiabilidad y establecer un método estándar de presentación de los resultados ecográficos para la enfermedad arteriosclerótica de la arteria carótida. (Traducido del inglés: **Grading Carotid Stenosis Using Ultrasonic Methods. Stroke. 2012;43:916-921.**)

Palabras clave: carotid stenosis ■ degree of stenosis ■ duplex sonography ■ peak systolic velocity
■ transcranial sonography ■ ultrasound diagnosis

Desde los inicios de la ecografía Doppler, ha habido un debate continuado acerca de la fiabilidad de esta técnica y luego de la ecografía dúplex para determinar el grado de estenosis de una arteria carótida interna. Más recientemente, la evidencia de un efecto favorable de la cirugía carotídea con una dependencia muy estrecha del grado de estenosis^{1,2} ha pasado a ser la fuerza impulsora que ha prolongado esta controversia³⁻⁶. Se ha producido, además, una mejora constante en las técnicas de imagen de modo B (p. ej., flujo a color, flujo B). Sin embargo, la angiografía de rayos X convencional se utiliza con menor frecuencia, dado su riesgo, aunque se han hecho grandes avances con las técnicas de imagen de RM y TC. Además, resulta difícil realizar una declaración

general acerca de la fiabilidad de la ecografía Doppler ya que no hay un conjunto de criterios universalmente aceptado para medir el grado de estenosis y no existe un consenso respecto a la ponderación relativa que debe asignarse a los diferentes criterios. En consecuencia, no se aprecia suficientemente el papel de los métodos ecográficos en la toma de decisiones. Por ejemplo, en una reciente declaración científica de la *American Heart Association*⁷, la “ecografía carotídea” para la detección de las lesiones quirúrgicas se clasificó como un instrumento para el examen de detección sistemática que no era adecuado para un uso como única metodología para establecer el diagnóstico definitivo. Sin embargo, algunos ensayos amplios han utilizado la ecografía carotídea como

Recibido el 12 de agosto de 2011; aceptado el 15 de noviembre de 2011.

Neurologische Praxis am Ambulanten Kardiologischen Zentrum (G.M.R.), Bad Nauheim, Alemania; Klinik für Neurologie (M.W.G.), Universität Magdeburg, Magdeburg, Alemania; y Neurosonology Research Group de la World Federation of Neurology (N.M.B., M.D.S., D.H.E., M.-W.G., A.H., M.K., F.P., A.R., M.v.R., T.S., E.T., P.T., N.V., L.K.S.W., M.Y.).

En nombre del Neurosonology Research Group de la World Federation of Neurology.

Remitir la correspondencia a Gerhard-Michael von Reutern, MD, PhD; Lassallestrasse 3, 61231 Bad Nauheim, Alemania. Correo electrónico g.v.reutern@gmx.de

© 2012 American Heart Association, Inc.

Puede accederse a *Stroke* en <http://stroke.ahajournals.org>

DOI: 10.1161/STROKEAHA.111.636084

método diagnóstico para la selección de los pacientes para la cirugía o la implantación de *stents* en la arteria carotídea^{8,9}. Además, las guías de la *American Heart Association* para la prevención primaria del ictus incluyen el uso de la ecografía Doppler como criterio de selección para el uso de la endarterectomía carotídea¹⁰.

El objetivo de este artículo es resumir la experiencia internacional existente con el uso de grados de la estenosis carotídea establecidos ecográficamente, incluido un reciente consenso publicado en alemán¹¹ y aprobado por todas las sociedades médicas de Alemania con actividad en el campo de la ecografía carotídea.

La patología subyacente

El substrato patogénico del ictus atribuible a la patología carotídea es una placa que causa efectos hemodinámicos atribuibles a una reducción del área y una estructura y superficie complicadas que finalmente acaban causando la formación de émbolos o una oclusión. Es la reducción del área producida por la estenosis, y no la reducción del diámetro, el parámetro anatómico que determina el efecto hemodinámico y las velocidades de flujo que se miden. En consecuencia, la reducción del diámetro por sí sola es insuficiente para evaluar el grado de estenosis, en especial en aquellas que son irregulares. La ecografía Doppler y la angiografía de rayos X (o la angio-RM o angio-TC) miden variables biológicas diferentes y la coincidencia completa es imposible. La composición de la placa, la vascularización de esta, el grosor de su cubierta, la ulceración de la placa y su movimiento son otros factores pronósticos que no se contemplan en este artículo, ya que no hay una evidencia establecida respecto a la toma de decisiones basada en estos datos.

Evaluación de la morfología

La ecografía en modo B es en la actualidad el mejor método para evidenciar el grosor de la pared arterial y la presencia de placas menores, y aporta imágenes de la pared en sí y no solo de la columna de sangre. Además, la enfermedad moderada puede identificarse en planos de corte longitudinales y transversales. En la enfermedad grave, las imágenes en modo B transversales son más difíciles de generar, debido a la presencia de sombra acústica y otros artefactos. Lo mismo puede decirse del flujo a color. En consecuencia, cuanto más grave es una estenosis, más importantes son los criterios hemodinámicos. La relación entre reducción de área y de diámetro depende del tipo de estenosis, es decir, de si es concéntrica o excéntrica. Esta última es frecuente si la placa crece enfrente del divisor del flujo. En este caso, la reducción del diámetro y del área son similares; sin embargo, en la estenosis concéntrica, el grado de estenosis medido como porcentaje de reducción del área es superior al medido con el porcentaje de reducción del diámetro¹². Es frecuente que la luz no sea circular (concéntrica) o semicircular (excéntrica) sino reniforme o completamente irregular. A pesar de estas limitaciones, la reducción del diámetro identificada en la angiografía de rayos X se considera, en general, el patrón de referencia para la toma de decisiones, ya que este método fue elegido por los estudios NASCET¹ y ECST² en los años ochenta del pasado siglo¹³. Dado el aumento de tamaño del bulbo carotídeo, se hace necesario definir el tipo de medición según el ECST

(reducción del diámetro local utilizando como denominador el diámetro original a nivel de la estenosis) o según el estudio NASCET (tomando como denominador el diámetro distal al bulbo)¹⁴. La reducción del diámetro local ilustra mejor la carga de placa existente. La estenosis relacionada con el diámetro distal se corresponde mejor con el efecto hemodinámico y es preferida por los radiólogos y en las guías existentes para la toma de decisiones clínicas. Otro motivo de preocupación es que, en una estenosis grave, el volumen de flujo postestenótico disminuye y, por tanto, el diámetro del segmento distal sufre un “colapso”, que conduce a un grado calculado inferior de estenosis. Así pues, el criterio del NASCET no debe aplicarse en esta situación¹⁵. Tanto el tipo de medición del NASCET como el del ECST son viables con las técnicas de imagen de modo B, si es posible visualizar la luz residual de la estenosis y la luz del segmento postestenótico. Las técnicas de imagen de flujo a color, por sí solas, son menos fiables para la determinación del diámetro o del área, debido a la influencia del contexto de ganancia.

Evaluación del efecto hemodinámico

El estrechamiento arterial conduce a un aumento local de las velocidades. Se alcanza un efecto hemodinámico cuando la presión y el volumen de flujo están reducidos en el segmento postestenótico. Este efecto tiene importancia clínica debido a que la probabilidad de que exista una estructura de la placa complicada, propensa a la embolización, es mayor en esta situación. Además, existe un riesgo de isquemia, debido a un aporte de sangre insuficiente. La velocidad del flujo medida con la ecografía Doppler está correlacionada con la estenosis medida con la reducción del área. La correlación entre velocidad y grado de estenosis se pone de relieve en la “curva de Spencer”^{12,16}. Numerosos estudios han examinado la exactitud y fiabilidad de este criterio para la determinación del grado de la estenosis y, por consiguiente, su uso ha pasado a ser ampliamente aceptado como criterio para establecer el grado¹⁷⁻¹⁹. Sin embargo, todas las correlaciones publicadas de la angiografía de rayos X y la velocidad sistólica máxima (VSM) en la estenosis muestran una considerable dispersión de los resultados²⁰⁻²⁴. Este fue el fundamento de la decisión de no aceptar la ecografía dúplex por sí sola como método para establecer el diagnóstico definitivo por parte de la *American Heart Association*^{5,7}. Hay muchas razones por las que este criterio, sea cual sea el umbral que se utilice, no concuerda a menudo con el resultado angiográfico y tiene un valor limitado si se usa de forma aislada. En primer lugar, hay que considerar la morfología de la estenosis, tal como se ha comentado (área frente a diámetro, irregularidades mal representadas en todas las técnicas de imagen).

En segundo lugar, debe tenerse en cuenta la ambigüedad de la “curva de Spencer”, con la posibilidad de que la velocidad sea la misma en una estenosis moderada que en una arteria casi ocluida^{12,25}. La velocidad en una estenosis aumenta con el grado creciente de la misma, pero se reduce en situaciones de casi oclusión.

En tercer lugar, hay errores y convenciones diferentes en la medición del ángulo de insonación que es necesario para convertir las frecuencias Doppler registradas en velocidades²⁶. Como consecuencia de la función coseno del ángulo en la ecuación Doppler, el posible error es superior cuanto

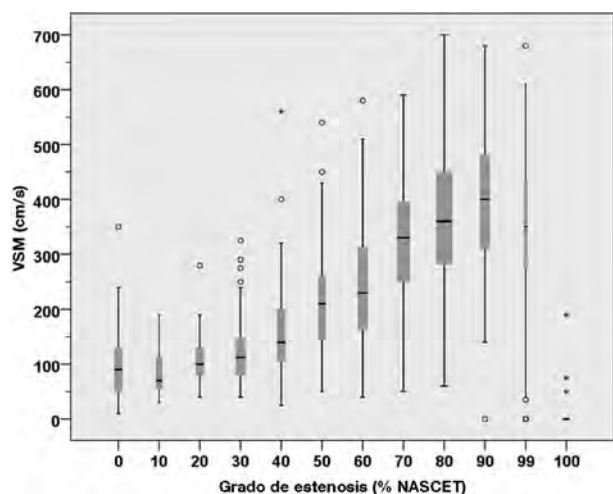


Figura. Gráficos *boxplot* de la velocidad sistólica máxima (VSM; cm/s) frente al grado de estenosis NASCET (%) en 977 estenosis de 5 estudios²⁰⁻²⁴. El gráfico muestra la mediana de la VSM, el rango intercuartílico del 25% al 75% (recuadros), y el rango intercuartílico del 0% al 100% (líneas en T), exceptuando los valores atípicos (círculos) y los valores extremos (asteriscos). Los valores emparejados de VSM y NASCET para las 977 estenosis se han obtenido a partir de los gráficos de dispersión originales mediante una cuadrícula para la VSM (distancia de 10 cm/s) y el grado de estenosis NASCET (distancia del 1%) tras una amplificación de 4 aumentos. Las clases NASCET del 10% incluían la VSM de un máximo del 5% por debajo y un 4% por encima del valor de la clase; por ejemplo, del 55% al 64% para la clase del 60%. En total, 977 de los 1.106 (88%) pares pudieron ser reconstruidos. La mayoría de los pares no disponibles (debido a valores idénticos o a una agrupación con una resolución gráfica insuficiente) se produjeron en el grado de estenosis NASCET del 0% y < 30%, y por tanto no debe permitirse que sigan el uso clínico de estos datos.

mayor es el ángulo. El ángulo puede estimarse bastante bien en condiciones de flujo laminar, pero resulta difícil hacerlo cuando hay perturbaciones del flujo, en las que las líneas de dirección del flujo difieren de las del trayecto del vaso. La disposición helicoidal de la perturbación del flujo postestenótico (o a causa de la curvatura del vaso) puede conducir a una sobreestimación de las velocidades, debido a una estimación incorrecta del ángulo, incluso con el empleo de técnicas de imagen de flujo color como guía. Las técnicas de imagen de flujo color bidimensionales no permiten visualizar de manera fiable la orientación de las líneas de dirección del flujo en 3 dimensiones en condiciones de perturbación del flujo. Por último, el procedimiento poco definido sobre cómo corregir el ángulo de insonación en caso de estenosis puede variar de una forma sistemática de un laboratorio a otro, y ello incrementa el problema de la fiabilidad de los umbrales recomendados de velocidades.

En cuarto lugar, hay que considerar la influencia del flujo colateral. Las velocidades que se dan en una estenosis dependen del flujo colateral dirigido al territorio irrigado por la arteria estenosada. El flujo colateral por el polígono de Willis, y de manera menos efectiva a través de la arteria oftálmica, sólo está presente cuando hay una estenosis hemodinámicamente significativa. Cuanto mayor es la capacidad de esta red colateral, menor es la reducción de la presión postestenótica y, por consiguiente, la velocidad intraestenótica²⁷. Dado que

existe una considerable variabilidad en el polígono de Willis, su influencia en la VSM difiere de un paciente a otro. Lo mismo ocurre en la VSM contralateral a una oclusión de la arteria carótida interna²⁸.

En quinto lugar, hay problemas técnicos en el análisis espectral. El espectro Doppler generado por una estenosis corta está formado habitualmente por componentes de alta frecuencia (velocidad), que corresponden al chorro, y componentes de baja frecuencia atribuibles a los torbellinos y la separación del flujo. La importancia relativa de los componentes de alta frecuencia puede ser tan baja que no se aprecien sin un filtro especial para los valores altos o un ajuste de la ganancia. Esto puede conducir a una infravaloración de la VSM²⁹.

Teniendo en cuenta todos estos factores, parece evidente que la VSM, como único parámetro diagnóstico simplificado, resulta insuficiente. Incluso con los valores de VSM media para un determinado grado de estenosis, obtenidos en casi 980 pacientes de 5 estudios (Figura)²⁰⁻²⁴, la dispersión prácticamente impide una cuantificación fiable del porcentaje de estenosis NASCET basada en la VSM sola, sea cual sea el umbral recomendado. El valor de la VSM media y la distribución de los valores de VSM en el rango de dispersión para un determinado grado de estenosis son factores a tener cuenta, además del valor umbral. En combinación con otros criterios adicionales (Tabla), es posible decidir si una VSM medida corresponde a una estenosis más o menos grave dentro del rango de dispersión de valores.

Criterios principales y adicionales

Con el conjunto existente de parámetros ecográficos, es importante utilizarlos con su ponderación relativa (Tabla)¹¹. Los criterios principales corresponden a una información morfológica y hemodinámica esencial. Su valor relativo depende de la gravedad de la estenosis; por ejemplo, las técnicas de imagen de modo B son más relevantes que los valores de velocidad en la enfermedad de bajo grado. Sin embargo, la presencia de flujo colateral es un indicador de la estenosis grave más potente que la VSM^{18,29}. Los criterios adicionales son elementos de apoyo, generalmente más difíciles de cuantificar. La cantidad de perturbaciones del flujo evidenciadas en la forma de onda espectral (ensanchamiento espectral y señales de flujo bilateral) depende del grado de estenosis. Aumenta con la gravedad creciente y la VSM pero se reduce nuevamente cuando hay una estenosis muy intensa. Lo mismo ocurre en cuanto a la longitud del campo de flujo con las perturbaciones. Las diferencias en las velocidades en la arteria carótida común entre un lado y otro están presentes en la oclusión de la arteria carótida interna o en la estenosis grave, pero son menos fiables para la diferenciación entre estenosis del 60% y el 70%.

Durante una exploración neurosonológica completa de un paciente con una estenosis de la arteria carótida interna, se realizan múltiples observaciones útiles respecto a todas las características enumeradas en la Tabla. La cuestión que se plantea es la de cuál es su valor para la determinación del grado de estenosis; por ejemplo, la imagen de flujo a color muestra un claro estrechamiento en un caso de estenosis hemodinámicamente relevante; sin embargo, su valor para la medición directa del grado de estenosis es bajo. No obstante, facilita la localización de la estenosis.

Tabla. Criterios combinados para la determinación del grado de estenosis carotídea interna

Determinación del grado de estenosis de carótida interna	Grado de estenosis definido por el NASCET (%)						
	10-40	50	60	70	80	90	Oclusión
Criterios principales							
1. Imagen en modo B, diámetro	Aplicable	Posiblemente aplicable					Exploración de imagen de oclusión en una arteria ocluida
2. Imagen de Doppler color	Delimitación de la placa	Flujo	Flujo	Flujo	Flujo	Flujo	Ausencia de flujo
3. VSM umbral (cm/s)		125		230		NP	NP
4a. VSM media (cm/s)	≤ 160	210	240	330	370	Variable	NP
4b. VSM postestenótica (cm/s)				≥ 50	< 50	< 30	NP
5. Flujo colateral (arterias periorbitarias o polígono de Willis)				Posible	Presente	Presente	Presente
Criterios adicionales							
6. Flujo preestenótico (diástole) (ACC)				Posiblemente reducido	Reducido	Reducida	Reducido
7. Perturbaciones del flujo postestenótico (gravedad y longitud)		Moderado	Pronunciado	Pronunciado	Pronunciado	Variable	NP
8. Velocidad de flujo telediastólico en la estenosis (cm/s)			< 100	> 100		Variable	NP
9. Cociente carotídeo ACI/ACC	< 2	≥ 2	≥ 2	> 4	> 4	Variable	NP

Estos criterios no se aplican a la estenosis de la carótida externa. Obsérvese el orden jerárquico de los criterios principales y adicionales y el cambio de la fiabilidad de cada criterio para diferentes grados de estenosis. En el texto se presentan ejemplos sobre cómo utilizar esta Tabla, en los apartados de "Criterios principales y adicionales" y "Ventajas de un enfoque con múltiples parámetros". Para la definición de las clases de estenosis, véase el pie de la Figura.

Criterio 1: Es necesaria la visualización de la ACI mediante técnicas de imagen de modo B para demostrar la ausencia de flujo.

Criterio 4a: Valores tomados de la Figura.

Criterio 4b: Postestenótico indica medido distalmente a las turbulencias. En caso de un cuello corto o una bifurcación en una posición alta, respectivamente, estos criterios son difíciles de valorar con una técnica dúplex convencional. En esta situación, una posición lateral de examen de la cabeza, por detrás del ángulo mandibular, o un examen de la cabeza con una frecuencia inferior, como la de las exploraciones abdominales, pueden permitir el acceso a los segmentos de la ACI de localización más distal. Otra posibilidad es el examen de la ACI distal con ecografía Doppler pulsada de 2 MHz.

Criterio 6: "Reducido" significa que hay una diferencia entre un lado y otro, principalmente en la velocidad diastólica.

Modificado de la referencia 11.

ACC indica arteria carótida común; ACI, arteria carótida interna; NP, no procede; VSM, velocidad sistólica máxima.

Ventajas de un enfoque basado en múltiples parámetros

La ecografía diagnóstica brinda la oportunidad de utilizar criterios tanto morfológicos como hemodinámicos. Se describen a continuación los principales pasos de la determinación del grado de estenosis (los porcentajes corresponden a aproximaciones; Figura).

Estenosis de grado bajo - 0% a 40% (NASCET)

Este es el campo en el que prevalecen las técnicas de imagen en modo B en los planos longitudinal y transversal. La determinación de la velocidad descarta una estenosis más grave, que a veces sugiere un plano transversal inapropiado. Se recomienda medir, además de la reducción del diámetro en porcentaje, el grosor y la longitud de la placa, así como la luz residual.

Estenosis moderada - 50% a 60% (NASCET)

Esta es una clase de estenosis en la que el aumento local de la velocidad, el flujo a color y las técnicas de imagen en modo B pueden combinarse para la determinación del grado. La VSM es, en general, < 230 cm/s. No hay flujo colateral.

Estenosis hemodinámicamente relevante - ≥ 70% (NASCET)

En este ámbito predominan los criterios hemodinámicos combinados, como el aumento de la VSM o la velocidad telediastólica, o el "cociente carotídeo" (cociente de la VSM de la carótida interna respecto a la carótida común), pero existe un considerable solapamiento con las estenosis moderadas. El flujo colateral se identifica mediante el examen de las ramas de la arteria oftálmica (prueba Doppler oftálmica), la arteria cerebral anterior, demostrando un flujo cruzado o el segmento P1 de la arteria cerebral posterior, que indica un flujo colateral a través de la arteria comunicante posterior. En caso de que exista un flujo colateral establecido, se evalúa la relevancia hemodinámica de la estenosis, que puede clasificarse como de grado alto (≥ 70% NASCET independientemente de la VSM intraestenótica)²⁹. Otro criterio es la velocidad del flujo postestenótico en el segmento distal al campo de perturbación del flujo. En el caso de que exista una reducción clara de la pulsatilidad de la señal y la velocidad postestenótica (por ejemplo, < 30 cm/s de VSM), la reducción del diámetro es ≈ 90% y la luz residual es < 1 mm, con independencia de la VSM en la estenosis. El grado de reducción de la velocidad del flujo postestenótico (como resultado

de la reducción del volumen de flujo es útil para diferenciar entre la estenosis del 70% (grave) y la del 80% al 90% (muy grave), distinción esta que no es posible realizar utilizando solamente los valores de VSM. La comparación con la arteria carótida interna contralateral no afectada es útil para apreciar la reducción del flujo postestenótico. Las técnicas de imagen de flujo a color son importantes como guía para medir la velocidad y son esenciales para diferenciar la oclusión de la estenosis. Las técnicas de imagen de modo B tan solo excepcionalmente tienen una calidad suficiente para aportar una información adicional esencial en la determinación del grado de las estenosis graves.

¿Determinación del grado en múltiples pasos o dicotomizada como $\geq 70\%$ o $< 70\%$?

En la práctica clínica cotidiana, con la angiografía de sustracción digital, la estenosis se cuantifica en pasos sucesivos de un 10%, tanto si se mide con un calibrador como si se hace a simple vista. Pueden describirse unos pasos similares teniendo en cuenta los criterios ecográficos descritos. La comparación entre la angiografía de sustracción digital y los métodos ecográficos, utilizando pasos pequeños de este tipo conduce siempre a discrepancias, dadas las limitaciones de ambos métodos. Sin embargo, las estadísticas producen un IC inferior al comparar 2 grupos grandes utilizando un solo valor umbral. Sin embargo, no es esta la cuestión en el contexto clínico. Es muy probable que una estenosis muy grave sea clasificada por todos los métodos como intensa, y que una estenosis de bajo grado sea clasificada como tal. Sin embargo, en el caso de una estenosis clasificada con un método como del 50% y con otro como del 70%, la cuestión vuelve a ser la misma: ¿es fiable una determinación del grado en pasos menores? ¿qué método debemos utilizar para la toma de decisiones? El enfoque ecográfico con múltiples parámetros es útil para evitar errores de clasificación. La evolución de la importancia de los parámetros para pasar de las imágenes de modo B a la velocidad y los parámetros hemodinámicos al aumentar la gravedad de la estenosis hace posible la descripción de entidades con diferencias fisiológicas reales. ¿Hay flujo colateral o hay una reducción de la velocidad del flujo postestenótico (y del diámetro del vaso), y, si es así, en qué grado? Así pues, la descripción ecográfica resultante de los grados de estenosis no representa una pseudoprecisión. En la categoría de la estenosis grave, la reducción de la velocidad postestenótica puede describir efectos hemodinámicos diferentes¹² con posibles implicaciones pronósticas^{30,31}.

Nivel de competencia

Naturalmente, es justificable el empleo de la ecografía simplemente como método de detección sistemática si no se dispone de equipamiento y experiencia avanzados. Puede ser suficiente diferenciar los resultados claramente normales de los patológicos y añadir entonces otras modalidades diagnósticas. Esto debe contemplarse no solo desde un punto de vista de fundamentos técnicos sino también desde una perspectiva clínica. El ataque isquémico transitorio con una evolución de crescendo requiere una evaluación más rápida y más definitiva que un síntoma dudoso de hace 1 mes. Cualquier análisis acerca de la toma de decisión clínica debe abordarse en el marco de los 3 niveles de capacitación

y competencia (básico, experto, científico y docente) según lo definido por la EFSUMB (<http://www.efsumb.org/guías/2009-04-14apx8.pdf>) o las correspondientes definiciones de ámbito nacional.

Recomendaciones

El método NASCET de medición de una estenosis debe utilizarse como método estándar; puede medirse, además, el estrechamiento local (ECST), pero debe indicarse que se hace así. Con ello se evitarán las confusiones. La determinación del grado de estenosis carotídea mediante la ecografía diagnóstica debe basarse fundamentalmente en la información morfológica (modo B, flujo a color o flujo B) en los casos de estenosis de grado bajo a moderado. Además del grado de estrechamiento, debe indicarse el grosor de la placa, la longitud de esta y la luz residual.

Las determinaciones de la velocidad en una estenosis (VSM y cociente carotídeo), por sí solas, no bastan para diferenciar una estenosis moderada de una estenosis grave ($\geq 70\%$ NASCET) con una fiabilidad clínica suficiente. Se recomienda realizar, además, una búsqueda del posible flujo colateral en las ramas de la arteria oftálmica (Doppler de onda continua [CW]) o en la arteria cerebral anterior (Doppler transcraneal o ecografía dúplex con código de color). Además, se recomienda examinar la velocidad de flujo postestenótico distal a las perturbaciones del flujo, en que una reducción de las velocidades (según la comparación con el lado contralateral no afectado o según la reducción absoluta) permite una determinación adicional del grado dentro de la categoría de estenosis grave.

Los criterios hemodinámicos son apropiados para establecer el grado de las estenosis de moderadas a graves. Los criterios deben aplicarse en un orden jerárquico. El flujo colateral establecido es el criterio más potente, y descarta una estenosis inferior a la grave, con independencia de la VSM.

Se recomienda tener especial cuidado al convertir frecuencias Doppler en velocidad con la medición del ángulo de incidencia (ángulo Doppler). Las determinaciones deben realizarse con el ángulo de insonación menor posible y en relación con la dirección del chorro visualizado mediante el flujo de velocidad a color y no en relación con el trayecto del vaso sanguíneo. En presencia de una estenosis irregular, debe tenerse en cuenta la sobreestimación de las velocidades atribuible a la perturbación del flujo o al flujo helicoidal.

Valor clínico de la ecografía Doppler

Estas recomendaciones tienen como objetivo estandarizar los criterios para la determinación del grado de la estenosis carotídea. Algunas de las guías publicadas no incluyen un conjunto de criterios como el recomendado en este artículo. Como consecuencia de ello, no se ha apreciado suficientemente el papel de los métodos ecográficos. La declaración de la *American Heart Association*⁷ que niega un papel diagnóstico a la ecografía más allá de su uso como método de detección sistemática, se basa en una revisión de la literatura que incluye muchos estudios en los que se utiliza como único criterio la “velocidad sistólica máxima,” un parámetro con importantes limitaciones, como se ha explicado. Además, esta declaración no tiene en cuenta las posibilidades de error de clasificación grave mediante la angiografía, como

consecuencia de los artefactos del plano de corte transversal en una estenosis de moderada a grave o en las que son completamente irregulares. Si se utiliza la ecografía en vez de la angiografía de rayos X para la toma de decisiones frente a estas “guías basadas en la evidencia”, las exigencias de una experiencia certificada, incluida la autoevaluación continua y la documentación detallada, son elevadas. Cualquier decisión basada tan solo en un examen de la carótida a nivel cervical y un único valor de la velocidad no cumple estas exigencias. La ecografía diagnóstica tiene el potencial de clasificar y determinar el grado de la enfermedad carotídea con una elevada fiabilidad, si se tienen en cuenta parámetros morfológicos y parámetros hemodinámicos complejos. Estos parámetros corresponden a variables fisiológicas que están correlacionadas con el pronóstico.

Declaraciones de intereses

Ninguna.

Bibliografía

- North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial (NASCET) Collaborators. Beneficial effect of carotid endarterectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis. *N Engl J Med.* 1991;325:445–453.
- European Carotid Surgery Trialists' Collaborative Group. MRC European Carotid Surgery Trial: interim results for symptomatic patients with severe (70–99%) or with mild (0–29%) carotid stenosis. *Lancet.* 1991;337:1235–1243.
- Eliasziw M, Rankin RN, Fox AJ, Haynes RB, Barnett HJ. Accuracy and prognostic consequences of ultrasonography in identifying severe carotid artery stenosis. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial (NASCET) Group. *Stroke.* 1995;26:1747–1752.
- Ringelstein EB. Skepticism toward carotid ultrasonography. A virtue, an attitude, or fanaticism? *Stroke.* 1995;26:1743–1746.
- Barnett HJ, Warlow CP. Carotid endarterectomy and the measurement of stenosis. *Stroke.* 1993;24:1281–1284.
- Wardlaw JM, Chappell FM, Best JJ, Wartolowska K, Berry E, NHS Research and Development Health Technology Assessment Carotid Stenosis Group. Non-invasive imaging compared with intra-arterial angiography in the diagnosis of symptomatic carotid stenosis: a meta-analysis. *Lancet.* 2006;367:1503–1512.
- Latchaw RE, Alberts MJ, Lev MH, Connors JJ, Harbaugh RE, Higashida RT, et al. Recommendations for imaging of acute ischemic stroke: a scientific statement from the American Heart Association. *Stroke.* 2009;40:3646–3678.
- GALA Trial Collaborative Group, Lewis SC, Warlow CP, Bodenham AR, Colam B, Rothwell PM, et al. General anaesthesia versus local anaesthesia for carotid surgery (GALA): a multicentre, randomised controlled trial. *Lancet.* 2008;372:2132–2142.
- SPACE Collaborative Group, Ringleb PA, Allenberg J, Bruckmann H, Eckstein HH, Fraedrich G, et al. 30 day results from the SPACE trial of stent-protected angioplasty versus carotid endarterectomy in symptomatic patients: a randomised non-inferiority trial. *Lancet.* 2006;368:1239–1247.
- Goldstein LB, Bushnell CD, Adams RJ, Appel LJ, Braun LT, Chaturvedi S, et al. Guidelines for the primary prevention of stroke: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke.* 2011;42:517–584.
- Aming C, Widder B, von Reutern GM, Stiegler H, Gortler M. [Revision of DEGUM ultrasound criteria for grading internal carotid artery stenoses and transfer to NASCET measurement]. *Ultraschall Med.* 2010;31:251–257.
- Spencer MP, Reid JM. Quantitation of carotid stenosis with continuous-wave (C-W) Doppler ultrasound. *Stroke.* 1979;10:326–330.
- Rothwell PM, Gibson RJ, Slattery J, Sellar RJ, Warlow CP. Equivalence of measurements of carotid stenosis. A comparison of three methods on 1001 angiograms. European Carotid Surgery Trialists' Collaborative Group. *Stroke.* 1994;25:2435–2439.
- Widder B, von Reutern GM, Neuerburg-Heusler D. [Morphologic and Doppler sonographic criteria for determining the degree of stenosis of the internal carotid artery]. *Ultraschall Med.* 1986;7:70–75.
- Rothwell PM, Warlow CP. Low risk of ischemic stroke in patients with reduced internal carotid artery lumen diameter distal to severe symptomatic carotid stenosis. Cerebral protection due to low poststenotic flow? On behalf of the European Carotid Surgery Trialists' Collaborative Group. *Stroke.* 2000;31:622–630.
- Alexandrov AV. The Spencer's Curve: clinical implications of a classic hemodynamic model. *J Neuroimaging.* 2007;17:6–10.
- Alexandrov AV, Bladin CF, Muggisano R, Norris JW. Measuring carotid stenosis. Time for a reappraisal. *Stroke.* 1993;24:1292–1296.
- de Bray JM, Glatt B. Quantification of atheromatous stenosis in the extracranial internal carotid artery. *Cerebrovasc Dis.* 1995;5:414–426.
- Grant EG, Benson CB, Moneta GL, Alexandrov AV, Baker JD, Bluth EI, et al. Carotid artery stenosis: gray-scale and Doppler US diagnosis—Society of Radiologists in Ultrasound Consensus Conference. *Radiology.* 2003;229:340–346.
- Fillinger MF, Baker RJ Jr, Zwolak RM, Musson A, Lenz JE, Mott J, et al. Carotid duplex criteria for a 60% or greater angiographic stenosis: variation according to equipment. *J Vasc Surg.* 1996;24:856–864.
- Hunink MG, Polak JF, Barlan MM, O'Leary DH. Detection and quantification of carotid artery stenosis: efficacy of various Doppler velocity parameters. *AJR Am J Roentgenol.* 1993;160:619–625.
- Koga M, Kimura K, Minematsu K, Yamaguchi T. Diagnosis of internal carotid artery stenosis greater than 70% with power Doppler duplex sonography. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2001;22:413–417.
- Moneta GL, Edwards JM, Papanicolaou G, Hatsukami T, Taylor LM Jr, Strandness DE Jr, et al. Screening for asymptomatic internal carotid artery stenosis: duplex criteria for discriminating 60% to 99% stenosis. *J Vasc Surg.* 1995;21:989–994.
- Neschis DG, Lexa FJ, Davis JT, Carpenter JP. Duplex criteria for determination of 50% or greater carotid stenosis. *J Ultrasound Med.* 2001;20:207–215.
- Kaps M, von Reutern GM, Stolz E, von Büdingen HJ, eds. *Ultraschall in der Neurologie*, II ed. Stuttgart, New York: Thieme; 2005.
- Phillips DJ, Beach KW, Primozich J, Strandness DE Jr. Should results of ultrasound Doppler studies be reported in units of frequency or velocity? *Ultrasound Med Biol.* 1989;15:205–212.
- Spencer MP. Hemodynamics of arterial stenosis. In: Spencer MP, eds. *Ultrasonic diagnosis of cerebrovascular disease*. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers; 1987.
- Henderson RD, Steinman DA, Eliasziw M, Barnett HJ. Effect of contralateral carotid artery stenosis on carotid ultrasound velocity measurements. *Stroke.* 2000;31:2636–2640.
- Reutern, GM von. Von Büdingen, HJ, eds. *Ultrasound diagnosis of cerebrovascular disease*. Stuttgart, New York: Thieme; 1993.
- Blaser T, Hofmann K, Buerger T, Effenberg O, Wallech CW, Goertler M. Risk of stroke, transient ischemic attack, and vessel occlusion before endarterectomy in patients with symptomatic severe carotid stenosis. *Stroke.* 2002;33:1057–1062.
- Goertler M, Blaser T, Guhr S, Lotze H, Heisinger J, Kropf S, et al. Reduced frequency of embolic signals in severe carotid stenosis with poststenotic flow velocity reduction. *Cerebrovasc Dis.* 2005;19:229–233.

Оценка каротидного стеноза с помощью ультразвуковых методов диагностики

Источник. G.-M. von Reutern, M.-W. Goertler, N.M. Bornstein, M. Del Sette, D.H. Evans, A. Hetzel, M. Kaps, F. Perren, A. Razumovky, T. Shiogai, E. Titianova, P. Traubner, N. Venketasubramanian, L.K.S. Wong, M. Yasaka, от имени Neurosonology Research Group of the World Federation of Neurology. Grading carotid stenosis using ultrasonic methods. *Stroke*. 2012;43:3:916–921.

Neurologische Praxis am Ambulanten Kardiologischen Zentrum, Bad Nauheim, Germany; Klinik für Neurologie, Universität Magdeburg, Magdeburg, Germany; and Neurosonology Research Group of the World Federation of Neurology.

Абстракт. Споры относительно роли доплерографических методов обследования в принятии клинических решений при профилактике развития инсульта обусловлены выявленными разногласиями между результатами ангиографии и ультрасонографии и отсутствием повсеместно принятых ультразвуковых критериев для описания степени стеноза. Главным объяснением считают широкий разброс пиковых скоростей кровотока в систолу при стенозе, т.е. критерия, которому до настоящего времени уделяли наибольшее внимание. Классификация, основанная на множестве основных и дополнительных критериев, позволит избежать диагностических ошибок. Морфологические параметры (изображения в В-режиме и цветовое картирование кровотока) являются основными критериями оценки стенозов легкой и умеренной степеней. Повышение скорости при стенозе указывает на сужение артерии, однако появление коллатерального кровотока и снижение скорости кровотока на участке после стеноза являются признаками высокой степени стеноза ($\geq 70\%$), дополнительно позволяющими оценить гемодинамический эффект стеноза высокой степени. К дополнительным критериям относятся характеристики пресистолического кровотока (общая сонная артерия), степень нарушения постстенотического кровотока и производные от скорости (пиковая скорость в диастолу и каротидный индекс). Такой многофакторный подход предназначен для повышения надежности и стандартизации результатов ультрасонографии при атеросклеротическом поражении сонной артерии.

Ключевые слова: стеноз сонных артерий (carotid stenosis), степень стеноза (degree of stenosis), дуплексное УЗ-сканирование (duplex sonography), пиковая систолическая скорость (peak systolic velocity), транскраниальное УЗ-сканирование (transcranial sonography), ультразвуковая диагностика (ultrasound diagnosis)

С первых дней появления доплерографии в арсенале методов диагностики велись непрерывные дискуссии по поводу надежности ее результатов и позднее — дуплексного сканирования в определении степени стеноза внутренней сонной артерии. Позже доказательства положительного влияния оперативных вмешательств на сонной артерии, тесно связанные со степенью стеноза [1, 2], стали движущей силой в продлении этих дискуссий [3–6]. Произошло повышение качества визуализации в В-режиме, появились новые методики (например, цветовое картирование кровотока, В-кровоток). При этом традиционная рентгеновская ангиография используется реже в связи с имеющимся риском, кроме того, был достигнут прогресс в использовании МРТ и КТ. Более того, трудно сделать общее заявление о надежности ультразвуковой доплерографии, поскольку не существует общепринятого набора критериев для оценки степени стеноза, нет консенсуса относительно значимости различных критериев. В результате роль ультразвуковых методов диагностики в принятии решений ранее не оценивали. Например, в последнем научном положении American Heart Association [7] “УЗ-сканирование сонной артерии” для обнаружения ее повреждений было классифицировано как метод скрининга, не подходящий для использования в качестве единственного метода обследования для постановки окончательного диагноза. Тем не менее в некоторых крупных исследованиях используют ультрасонографию сонной артерии в

качестве метода диагностики для отбора пациентов на проведение хирургического вмешательства на сонной артерии или стентирования [8, 9]. Кроме того, в стандарты по оказанию медицинской помощи при первичной профилактике инсульта, разработанные American Heart Association, включены результаты ультразвуковой доплерографии в качестве критерия отбора для выполнения каротидной эндартерэктомии [10].

Цель данной работы заключалась в обобщении имеющегося международного опыта по оценке стеноза сонных артерий ультразвуковыми методами обследования, в т.ч. с учетом недавнего Соглашения, опубликованного в Германии [11] и одобренного всеми немецкими медицинскими обществами, врачи которых используют метод каротидной ультрасонографии.

Патологические изменения, лежащие в основе

Патогенетическими субстратами инсульта, связанными с патологическими изменениями сонной артерии, являются бляшки, вызывающие гемодинамические эффекты, обусловленные уменьшением площади, сложной структурой и поверхностью, которые со временем приводят к развитию эмболии или окклюзии. Уменьшение площади при стенозе, а не уменьшение диаметра сосуда, является анатомическим параметром для гемодинамического эффекта и измеряемой скорости кровотока. Таким образом, уменьшение диаметра само по себе недостаточно для оценки степени стеноза, особенно при его нерегулярности. Ультразвуковая доплерография и рентгеновская (или МР-, КТ-) ангиография оценивают различные биологические показатели, в связи с чем невозможно достичь общей согласованности. Другими прогностическими факто-

рами являются состав бляшки, васкуляризация бляшки, толщина покрышки, изъязвление и подвижность бляшки, однако их не включили в данную работу, поскольку не существует фактических данных для принятия решений на основе этих данных.

Оценка морфологии

Ультразвуковое обследование в В-режиме в настоящее время является лучшим методом демонстрации толщины стенки и наличия мелких бляшек, которое обеспечивает визуализацию самой стенки, а не только тока крови. Кроме того, умеренно выраженные патологические изменения можно отобразить в продольных и поперечных плоскостях. При выраженных изменениях сложнее генерировать поперечное сечение в В-режиме из-за затенения и других артефактов. То же самое относится и к цветовому картированию кровотока. Таким образом, при более выраженном стенозе превалирует большее число гемодинамических критериев.

Связь между уменьшением площади и диаметра зависит от типа стеноза, т.е. является ли он концентрическим или эксцентричным. Последний встречается чаще, если бляшка растет снаружy от кровотока. В этом случае уменьшение диаметра и площади сходно; однако при концентрическом сужении степень стеноза, измеренная в процентах уменьшения площади, выше, чем при измерении уменьшения диаметра [12]. Часто наблюдается не круговое (концентрическое) или полукруглое (эксцентричное) уменьшение просвета, а почкообразное или полностью нерегулярное. Несмотря на эти ограничения, уменьшение диаметра сосуда, по результатам рентгеновской ангиографии, является общепринятым “золотым стандартом” для принятия решений, эту методику выбрали в исследованиях *NASCET* [1] и *ECST* [2] в 1980-е гг. [13]. Из-за расширения луковицы сонной артерии необходимо определить вариант измерения, согласно исследованиям *ECST* (локальное уменьшение диаметра с истинным диаметром на уровне стеноза в качестве знаменателя) или *NASCET* (с диаметром дистальнее луковицы в качестве знаменателя) [14]. Локальное сужение диаметра лучше иллюстрирует негативное влияние бляшки. Сужение, связанное с диаметром дистальных отделов, лучше соотносится с гемодинамическим эффектом, в связи с чем этот показатель предпочтителен для радиологов и для существующих стандартов по оказанию помощи для принятия клинических решений.

Еще одна проблема заключается в том, что при тяжелом стенозе постстенотический СВВ уменьшается и в результате диаметр дистального сегмента “коллабирует”, что ведет к уменьшению рассчитываемой степени стеноза. Таким образом, в этой ситуации критерии *NASCET* применять не следует [15]. Варианты измерений, применявшиеся в исследованиях *NASCET* и *ECST*, можно использовать в В-режиме, если удастся визуализировать остаточный просвет стеноза и просвет постстенотических сегментов. Цветовое картирование кровотока само по себе

менее надежно для измерения диаметра или площади из-за влияния степени усиления.

Оценка гемодинамического эффекта

Сужение артерии приводит к локальному повышению скорости кровотока. Гемодинамический эффект достигается при снижении давления и объема кровотока в постстенотическом сегменте. Этот эффект имеет клиническое значение, поскольку в этой ситуации повышается вероятность образования бляшек со сложной структурой, предрасположенных к развитию эмболии. Кроме того, существует риск развития ишемии из-за недостаточного кровоснабжения. Скорость кровотока, измеряемая с помощью доплерографии, коррелирует с сужением, измеряемым по уменьшению площади. “Кривая Спенсера” демонстрирует корреляцию между скоростью кровотока и степенью стеноза [12, 16]. В многочисленных работах оценивали точность и надежность этого критерия для оценки степени стеноза и, следовательно, он стал общепринятым критерием классификации во всем мире [17–19]. Тем не менее все опубликованные данные о корреляции результатов рентгеновской ангиографии и пиковой систолической скорости (ПСС) кровотока при стенозе демонстрируют значительный разброс результатов [20–24]. Этот факт был предпосылкой для отклонения American Heart Association дуплексной сонографии в качестве единственного метода обследования для постановки окончательного диагноза [5, 7].

Существует много причин, почему этот критерий, вне зависимости от используемого порогового значения, часто противоречит результатам ангиографии и имеет ограниченную ценность при изолированном его рассмотрении.

Во-первых, это морфология стеноза, как обсуждалось ранее (площадь по сравнению с диаметром, особенности, которые плохо выявляются при использовании всех методик визуализации). Во-вторых, “кривая Спенсера” неоднозначна, поскольку скорость кровотока может быть одинаковой при умеренном стенозе и в почти окклюзированной артерии [12, 25]. Скорость кровотока при стенозе повышается с увеличением степени стеноза, но уменьшается в ситуации почти полной окклюзии.

В-третьих, существуют ошибки и различные правила в определении угла инсонации, необходимого для преобразования записанных доплеровских частот в показатели скорости [26]. Из-за функции \cos угла в уравнении Доплера, чем больше угол, тем больше вероятность ошибки. Угол достаточно просто оценить в условиях ламинарного течения крови, но в условиях нарушения кровотока это трудная задача, поскольку направление кровотока отличается от оси сосуда. Спиралеобразное формирование постстенотического кровотока (или из-за кривизны сосуда) может привести к переоценке скорости из-за неправильного измерения угла, даже при использовании цветового картирования кровотока в качестве ориентира. 2D цветовое картирование кровотока не позволяет надежно визуализировать направление кровотока в трех измерениях при

его нарушении. Наконец, недостаточно определенная процедура коррекции угла инсонации в случае стеноза может существенно отличаться в лабораториях, что дополнительно оказывает влияние на проблему учета рекомендованного порогового значения скоростей.

В-четвертых, коллатеральный кровоток также оказывает влияние. Скорость кровотока при стенозе зависит от кровотока в области кровоснабжения стенозированными артериями. Коллатеральный кровоток через Виллизиев круг и, менее эффективный, через глазную артерию, развивается только при гемодинамически значимом стенозе. Чем выше емкость этой коллатеральной сети, тем менее выражены постстенотическое снижение давления и, следовательно, интрастенотическая скорость кровотока [27]. Поскольку строение Виллизиева круга весьма вариабельно, его влияние на ПСС имеет выраженные индивидуальные отличия. То же самое справедливо и для ПСС, контралатеральной к окклюзии внутренней сонной артерии [28].

В-пятых, существуют технические проблемы спектрального анализа. Допплеровский спектр, образованный коротким по протяженности стенозом, как правило, состоит из высокочастотных (скорость) компонентов, представляющих струи, и низкочастотных

компонентов, связанных с вихрями и разделением кровотока. Удельный вес высокочастотных составляющих может быть настолько низким, что они не будут отображаться без специального высокочастотного фильтра и настройки усиления. Это может привести к недооценке ПСС [29].

Принимая во внимание все эти факторы, кажется очевидным, что расчет ПСС в качестве одного упрощенного диагностического параметра, недостаточен. Даже при средних значениях ПСС для данной степени стеноза, полученных при обследовании почти 980 пациентов из 5 исследований (см. рисунок) [20–24], вариабельность результатов практически не позволяет дать надежную количественную оценку степени стеноза у пациентов из исследования *NASCET* только на основе ПСС, вне зависимости от рекомендуемого порогового значения. Среднее значение ПСС и распределение значений ПСС в рамках вариабельности для заданной степени стеноза следует рассматривать в дополнение к пороговому значению. В сочетании с дополнительными критериями (см. таблицу), можно решить, будет ли измеренная ПСС в пределах диапазона вариабельности получаемых значений отражать наличие более или менее выраженного стеноза.

Таблица. Комплексные критерии для классификации стеноза внутренней сонной артерии

Степень стеноза, согласно критериям NASCET (%)	Градация стеноза внутренней сонной артерии						
	10–40	50	60	70	80	90	Окклюзия
Основные критерии							
1. Изображение в В-режиме, диаметр	Применимо	Применимо в некоторых случаях					Визуализация окклюзированной артерии
2. Цветовое доплеровское картирование	Очертание бляшки	Кровоток	Кровоток	Кровоток	Кровоток	Кровоток	Отсутствие кровотока
3. Пороговое значение ПСС, см/с		125		230		НП	НП
4а. Усредненная ПСС, см/с	≤160	210	240	330	370	Вариабельная	НП
4б. Постстенотическая ПСС, см/с				≥50	<50	<30	НП
5. Коллатеральный кровоток (периорбитальные артерии или Виллизиев круг)				Возможно	есть	есть	есть
Дополнительные критерии							
6. Престенотический кровоток (диастола) (ОСА)				Возможное снижение	Снижение	Снижение	Снижение
7. Постстенотические нарушения кровотока (тяжесть и протяженность)		Умеренные	Выраженные	Выраженные	Выраженные	Вариабельные	НП
8. Конечно-диастолическая скорость кровотока в зоне стеноза, см/с			<100	>100		Вариабельная	НП
9. Каротидное отношение ВСА/ОСА	<2	≥2	≥2	>4	>4	Вариабельная	НП

Примечание. Эти критерии неприменимы в случае стеноза наружной сонной артерии. Указан иерархический порядок основных и дополнительных критериев и изменение достоверности каждого критерия для различных степеней стеноза. Примеры использования этой таблицы представлены в тексте разделов “Основные и дополнительные критерии” и “Преимущества многофакторного подхода”. Для определения степени стеноза см. подписи под рисунком.

Критерий 1: Визуализация ВСА в В-режиме необходима для подтверждения отсутствия кровотока. Критерий 4а: Значения взяты из рисунка. Критерий 4б: Постстенотическая — измеренная дистальнее зоны турбулентности. В случае короткой шейки или высокого расположения бифуркации оценка этих критериев затруднительна при использовании традиционных дуплексных методов. Поэтому латеральное положение датчика ниже угла нижней челюсти или сканирование головы с более низкой частотой, как при исследовании органов брюшной полости, позволяет оценить более дистальные сегменты ВСА. Другим возможным методом исследования является визуализация дистальных отделов ВСА с помощью 2-мГц доплеровского сканирования в импульсном режиме. Критерий 6: “Снижение” обозначает side-to-side различие, главным образом, скорости в диастолу. Модифицирован по ссылке [11]. ОСА — общая сонная артерия, ВСА — внутренняя сонная артерия, НП — неприменимо, ПСС — пиковая систолическая скорость.

Основные и дополнительные критерии

При существующем наборе ультразвуковых параметров важно использовать их с учетом их клинической значимости (см. таблицу) [11]. Основные критерии представляют собой важные морфологические и гемодинамические показатели. Относительная значимость их зависит от выраженности стеноза, например визуализация в В-режиме является более актуальной, чем значения скорости при низкой степени стеноза. Тем не менее наличие коллатерального кровотока является более четким показателем выраженного стеноза, чем ПСС [18, 29]. Дополнительные критерии являются вспомогательными элементами, как правило, труднее поддающимися количественной оценке. Величина нарушений кровотока, о которой свидетельствует форма спектральной волны (расширение спектра и разнонаправленные сигналы кровотока), зависит от степени стеноза. Она увеличивается при нарастании тяжести и ПСС, но снижается при очень выраженном стенозе. То же самое относится и к протяженности области кровотока с нарушениями. Различия в скорости кровотока в общей сонной артерии присутствуют при окклюзии внутренней сонной артерии или выраженном стенозе, но они менее надежны для дифференцирования стенозов в 60 и 70%.

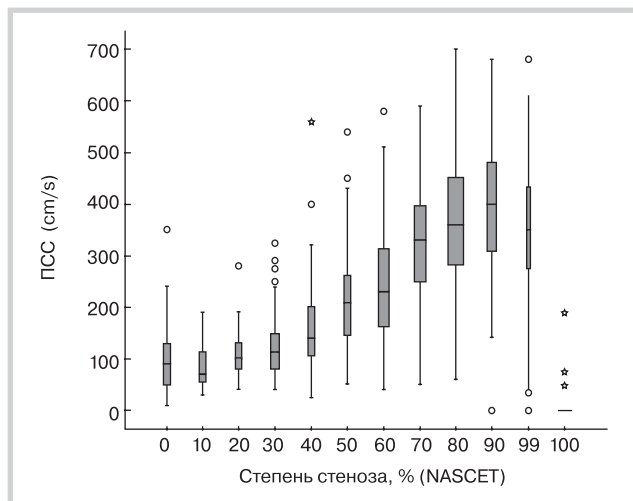


Рисунок. Коробчатая диаграмма сравнения пиковой систолической скорости (ПСС; см/с) и степени стеноза, согласно критериям NASCET (в %), для 977 стенозов из 5 исследований [20–24]. На графике показаны медиана ПСС, межквартильный размах от 25 до 75% (прямоугольники) и от 0 до 100% (Т-линии), за исключением отклоняющихся значений (кружки) и экстремальных значений (звездочки). Парные значения, ПСС и степень стеноза для 977 стенозов получены из оригинальных графических диаграмм рассеяния посредством линии сетки координат для ПСС (расстояние 10 см/с) и степени стеноза по NASCET (1% расстояния) после 4-кратного увеличения. 10% классов NASCET включили ПСС максимум на 5% ниже и на 4% выше значений класса, например от 55 до 64% для класса 60%. В целом 977 (88%) из 1106 пар можно реконструировать. Большинство пропущенных пар (в связи с идентичными значениями или кластеризацией с недостаточным графическим разрешением) встречались при 0 и <30% степени стеноза, согласно критериям NASCET, и поэтому клиническое использование этих данных недопустимо.

Во время полного нейросонологического обследования пациента со стенозом внутренней сонной артерии, можно будет сделать множество полезных наблюдений по всем показателям, перечисленным в таблице. Вопросом является их значимость для оценки степени стеноза, например цветовое картирование кровотока четко показывает наличие сужения в случае гемодинамически значимого стеноза; однако значимость результатов этого картирования для непосредственного измерения степени стеноза является низкой. Но она помогает определить локализацию стеноза.

Преимущества многофакторного подхода

Диагностическое УЗ-сканирование позволяет использовать морфологические и гемодинамические критерии. Далее описаны основные этапы классификации стенозов (проценты являются приближенными величинами, см. рисунок).

Стеноз низкой степени — от 0 до 40% (NASCET)

Это область визуализации в В-режиме в продольной и поперечной плоскостях. Измерение скорости исключает более выраженный стеноз, наличие которого иногда можно предположить при сканировании в различных плоскостях. Скорость кровотока рекомендуется измерять в дополнение к определению уменьшения диаметра (в процентах), толщине и протяженности бляшки, а также размеру остаточного просвета.

Умеренный стеноз — от 50 до 60% (NASCET)

Это класс стеноза, при котором по требованиям классификации рекомендовано сочетанно относить локальное увеличение скорости, проведение цветового картирования кровотока и визуализацию в В-режиме. ПСС, как правило, составляет менее 230 см/с. Коллатеральный кровоток не выражен.

Гемодинамически значимый стеноз >70% (NASCET)

Это область комбинированных гемодинамических критериев, таких как увеличение ПСС, конечная диастолическая скорость или “каротидный индекс” (отношение ПСС во внутренней сонной артерии к ПСС в общей сонной артерии), но существует значимое совпадение с критериями, характерными для умеренного стеноза. Коллатеральный кровоток можно обнаружить при изучении ветвей глазной артерии (доплеровский глазной тест), передней мозговой артерии, что доказывает наличие перекрестного кровотока, Р1 сегмента задней мозговой артерии, что указывает на коллатеральный кровоток через заднюю соединительную артерию. В случае выявления коллатерального кровотока гемодинамическая значимость стеноза считается доказанной и его можно отнести к стенозу высокой степени ($\geq 70\%$, по критериям NASCET, независимо от интрастенотической ПСС) [29]. Постстенотическая скорость кровотока в сегменте дистальнее области нарушенного кровотока является другим критерием. В случае явного снижения пульсации сигнала и постстенотической скорости кровотока (например, менее 30 см/с ПСС), уменьшение диаметра составляет при-

близительно 90%, а резидуальный просвет — менее 1 мм независимо от ПСС в области стеноза. Степень снижения постстенотической скорости кровотока (в результате снижения СВV) позволяет отличать стеноз 70% (выраженный) от стеноза 80–90% (крайне выраженный), а такая дифференцировка невозможна на основании только показателя ПСС. Сравнение с непораженной контралатеральной внутренней сонной артерией полезно для оценки снижения постстенотического кровотока. Цветовое картирование кровотока является важным ориентиром для оценки скорости и имеет существенное значение для дифференцировки окклюзии от стеноза. Визуализация в В-режиме является единственным методом достаточного качества для получения необходимой информации при оценке тяжелого стеноза.

Классификация в несколько этапов или дихотомическое разделение на >70% или <70%?

В повседневной практике использования цифровой субтракционной ангиографии стеноз количественно оценивают с шагом 10% путем проведения измерений с помощью циркуля или визуально. Подобные шаги могут быть охарактеризованы с учетом описанных ультразвуковых критериев. Сравнение цифровой субтракционной ангиографии и ультразвуковых методов, использующих такие маленькие шаги, всегда приводит к расхождениям в силу ограничений обоих методов. Тем не менее при статистическом анализе доверительный интервал меньше при сравнении 2 больших групп с использованием одинакового порогового значения. Однако в клинических условиях вопрос заключается не в этом. Очень выраженный стеноз, скорее всего, при использовании обоих методов будет классифицирован как тяжелый, а стеноз низкой степени будет классифицирован как менее выраженный. Тем не менее в случае, если стеноз одним из методов классифицируется как 50%, а другим как 70% снова появляется вопрос: надежна ли классификация с такими маленькими шагами? Какой метод мы будем использовать для принятия решений?

Мультипараметрический ультразвуковой подход помогает избежать ошибочной классификации. Сдвиг значимости критериев при визуализации в В-режиме до скорости и гемодинамических параметров с увеличением тяжести стеноза позволяет описать нозологические единицы с реальными физиологическими различиями. Развился ли коллатеральный кровоток или произошло снижение постстенотической скорости кровотока (и диаметра сосуда), и в какой степени? Таким образом, результирующее ультразвуковое описание степени стеноза не отражает псевдоточности измерения. В категории выраженного стеноза, постстенотическое снижение скорости кровотока позволяет описать различные гемодинамические эффекты [12] с возможным прогностическим значением [30, 31].

Уровень компетенции

Конечно, при недоступности передового опыта и оборудования оправдано использование ультразву-

ковой диагностики только как метода скрининга. Вполне возможно, что будет достаточно разграничить очевидно нормальные и патологические данные, а также добавить другие методы диагностики. Результаты следует рассматривать не только в зависимости от технической базы, но и с учетом клинической ситуации. Прогрессирование симптомов транзиторной ишемической атаки требует более быстрой и точной оценки, чем сомнительный симптом 1 месяц назад. Любая дискуссия о клинических решениях должна рассматриваться в рамках трех уровней знаний и компетенции (базовый, экспертный, научный и учебный), как определено EFSUMB (<http://www.efsumb.org/guidelines/2009-04-14apx8.pdf>) или соответствующими национальными определениями.

Рекомендации

Метод измерения стеноза в исследовании *NASCET* должен стать стандартом; локальное сужение (*ECST*) можно измерить дополнительно, но оно должно быть указано в протоколе. Это позволит избежать путаницы. Классификация стеноза сонных артерий по результатам ультразвукового исследования должна в первую очередь основываться на данных о морфологии (В-режим, цветовое картирование кровотока или В-визуализация кровотока) при низкой и умеренной степени стеноза. В дополнение к степени сужения необходимо указывать данные о толщине бляшки, протяженности бляшки и остаточном просвете.

Измерения скорости при стенозе (ПСС и каротидный индекс) самого по себе недостаточно для разграничения умеренного и тяжелого стенозов ($\geq 70\%$ по *NASCET*) с достаточной клинической достоверностью. Кроме того, рекомендуется проводить поиск коллатерального кровотока в ветвях глазной артерии (метод Допплера в непрерывном режиме) или передней мозговой артерии (транскраниальная доплерография или цветовое дуплексное сканирование). В дополнение рекомендуется оценивать постстенотическую скорость кровотока дистальнее зоны нарушения кровотока, при которой снижение скорости (по сравнению с непораженной контралатеральной стороной или абсолютное снижение) позволяет дополнительно провести классификацию в категории тяжелого стеноза.

Гемодинамические критерии подходят для классификации умеренного и тяжелого стенозов. Критерии необходимо рассматривать в иерархическом порядке. Установленное наличие коллатерального кровотока является наиболее мощным критерием, за исключением менее выраженного стеноза независимо от ПСС.

Особое внимание следует уделить преобразованию доплеровских частот в скорости путем измерения угла падения (доплеровский угол). Измерения необходимо проводить под максимально возможным низким углом инсонации и выполнять по направлению кровотока, визуализированного с помощью цветового картирования, а не по направлению сосу-

да. При фрагментарном стенозе необходимо учитывать переоценку скорости, связанную с нарушенным, спиралеобразным кровотоком.

Клиническое значение доплеровского УЗ-сканирования

Приведенные рекомендации предназначены для стандартизации критериев определения степени стеноза сонных артерий. В некоторых опубликованных рекомендациях не перечислен весь набор критериев, рекомендованных к использованию в данной статье. Как следствие, роль ультразвуковых методов была недооценена. В положении American Heart Association [7] на основании обзора литературы, отрицается роль диагностического ультразвукового исследования кроме как скринингового, в т.ч., по данным многих исследований, в которых в качестве единственного критерия использовали “пиковую систолическую скорость кровотока” — критерия с достаточно серьезными ограничениями, описанными ранее. Помимо того,

утверждение American Heart Association не учитывает возможности ошибочной классификации тяжелого стеноза в связи с артефактами поперечных проекций при умеренной и тяжелой степенях стеноза или при его фрагментарности. Если УЗИ используется вместо рентгеновской ангиографии для принятия решений в отношении таких “научно-обоснованных стандартов”, то требования к наличию сертифицированного опыта, включая непрерывное самосовершенствование и обширные наработки, должны быть весьма значительными. Любое решение, основанное только на сканировании сонных артерий на уровне шеи и одного значения скорости, не соответствует таким высоким требованиям. Диагностическое ультразвуковое исследование имеет потенциал для классификации и градации патологических изменений сонных артерий с высокой степенью достоверности, с учетом морфологических и сложных гемодинамических параметров. Эти параметры представляют собой физиологические переменные, коррелирующие с прогнозом.

ЛИТЕРАТУРА

1. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial (NASCET) Collaborators. Beneficial effect of carotid endarterectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis. *N Engl J Med.* 1991;325:445–453.
2. European Carotid Surgery Trialists' Collaborative Group. MRC European Carotid Surgery Trial: interim results for symptomatic patients with severe (70–99%) or with mild (0–29%) carotid stenosis. *Lancet.* 1991;337:1235–1243.
3. Eliasziw M., Rankin R.N., Fox A.J., Haynes R.B., Barnett H.J. Accuracy and prognostic consequences of ultrasonography in identifying severe carotid artery stenosis. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial (NASCET) Group. *Stroke.* 1995;26:1747–1752.
4. Ringelstein E.B. Skepticism toward carotid ultrasonography. A virtue, an attitude, or fanaticism? *Stroke.* 1995;26:1743–1746.
5. Barnett H.J., Warlow C.P. Carotid endarterectomy and the measurement of stenosis. *Stroke.* 1993;24:1281–1284.
6. Wardlaw J.M., Chappell F.M., Best J.J., Wartolowska K., Berry E., NHS Research and Development Health Technology Assessment Carotid Stenosis Group. Non-invasive imaging compared with intra-arterial angiography in the diagnosis of symptomatic carotid stenosis: a metaanalysis. *Lancet.* 2006;367:1503–1512.
7. Latchaw R.E., Alberts M.J., Lev M.H., Connors J.J., Harbaugh R.E., Higashida R.T., et al. Recommendations for imaging of acute ischemic stroke: a scientific statement from the American Heart Association. *Stroke.* 2009;40:3646–3678.
8. GALA Trial Collaborative Group, Lewis S.C., Warlow C.P., Bodenham A.R., Colam B., Rothwell P.M., et al. General anaesthesia versus local anaesthesia for carotid surgery (GALA): a multicentre, randomised controlled trial. *Lancet.* 2008;372:2132–2142.
9. SPACE Collaborative Group, Ringleb P.A., Allenberg J., Bruckmann H., Eckstein H.H., Fraedrich G., et al. 30 day results from the SPACE trial of stent-protected angioplasty versus carotid endarterectomy in symptomatic patients: a randomised non-inferiority trial. *Lancet.* 2006;368:1239–1247.
10. Goldstein L.B., Bushnell C.D., Adams R.J., Appel L.J., Braun L.T., Chaturvedi S., et al. Guidelines for the primary prevention of stroke: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke.* 2011;42:517–584.
11. Arning C., Widder B., von Reutern G.M., Stiegler H., Gortler M. [Revision of DEGUM ultrasound criteria for grading internal carotid artery stenosis and transfer to NASCET measurement]. *Ultraschall Med.* 2010;31:251–257.
12. Spencer M.P., Reid J.M. Quantitation of carotid stenosis with continuous-wave (C-W) Doppler ultrasound. *Stroke.* 1979;10:326–330.
13. Rothwell P.M., Gibson R.J., Slattery J., Sellar R.J., Warlow C.P. Equivalence of measurements of carotid stenosis. A comparison of three methods on 1001 angiograms. European Carotid Surgery Trialists' Collaborative Group. *Stroke.* 1994;25:2435–2439.
14. Widder B., von Reutern G.M., Neuerburg-Heusler D. [Morphologic and Doppler sonographic criteria for determining the degree of stenosis of the internal carotid artery]. *Ultraschall Med.* 1986;7:70–75.
15. Rothwell P.M., Warlow C.P. Low risk of ischemic stroke in patients with reduced internal carotid artery lumen diameter distal to severe symptomatic carotid stenosis. Cerebral protection due to low poststenotic flow? On behalf of the European Carotid Surgery Trialists' Collaborative Group. *Stroke.* 2000;31:622–630.
16. Alexandrov A.V. The Spencer's Curve: clinical implications of a classic hemodynamic model. *J Neuroimaging.* 2007;17:6–10.
17. Alexandrov A.V., Bladin C.F., Maggiano R., Norris J.W. Measuring carotid stenosis. Time for a reappraisal. *Stroke.* 1993;24:1292–1296.
18. de Bray J.M., Glatt B. Quantification of atheromatous stenosis in the extracranial internal carotid artery. *Cerebrovasc Dis.* 1995;5:414–426.
19. Grant E.G., Benson C.B., Moneta G.L., Alexandrov A.V., Baker J.D., Bluth E.I., et al. Carotid artery stenosis: gray-scale and Doppler US diagnosis—Society of Radiologists in Ultrasound Consensus Conference. *Radiology.* 2003;229:340–346.
20. Fillinger M.F., Baker R.J. Jr., Zwolak R.M., Musson A., Lenz J.E., Mott J., et al. Carotid duplex criteria for a 60% or greater

- angiographic stenosis: variation according to equipment. *J Vasc Surg.* 1996;24:856–864.
21. Hunink M.G., Polak J.F., Barlan M.M., O'Leary D.H. Detection and quantification of carotid artery stenosis: efficacy of various Doppler velocity parameters. *AJR Am J Roentgenol.* 1993;160: 619–625.
 22. Koga M., Kimura K., Minematsu K., Yamaguchi T. Diagnosis of internal carotid artery stenosis greater than 70% with power Doppler duplex sonography. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2001;22:413–417.
 23. Moneta G.L., Edwards J.M., Papanicolaou G., Hatsukami T., Taylor L.M. Jr., Strandness D.E. Jr., et al. Screening for asymptomatic internal carotid artery stenosis: duplex criteria for discriminating 60% to 99% stenosis. *J Vasc Surg.* 1995;21:989–994.
 24. Neschis D.G., Lexa F.J., Davis J.T., Carpenter J.P. Duplex criteria for determination of 50% or greater carotid stenosis. *J Ultrasound Med.* 2001;20:207–215.
 25. Kaps M., von Reutern G.M., Stolz E., von Büdingen H.J., eds. *Ultraschall in der Neurologie*, II ed. Stuttgart, New York: Thieme; 2005.
 26. Phillips D.J., Beach K.W., Primozich J., Strandness D.E. Jr. Should results of ultrasound Doppler studies be reported in units of frequency or velocity? *Ultrasound Med Biol.* 1989;15:205–212.
 27. Spencer M.P. Hemodynamics of arterial stenosis. In: Spencer MP, eds. *Ultrasonic diagnosis of cerebrovascular disease*. Dordrechts: Martinus Nijhoff Publishers; 1987.
 28. Henderson R.D., Steinman D.A., Eliasziw M., Barnett H.J. Effect of contralateral carotid artery stenosis on carotid ultrasound velocity measurements. *Stroke.* 2000;31:2636–2640.
 29. Reutern, G.M. von. Von Büdingen. *Ultrasound diagnosis of cerebrovascular disease*. Stuttgart, New York: Thieme; 1993.
 30. Blaser T., Hofmann K., Buerger T., Effenberg O., Wallesch C.W., Goertler M. Risk of stroke, transient ischemic attack, and vessel occlusion before endarterectomy in patients with symptomatic severe carotid stenosis. *Stroke.* 2002;33:1057–1062.
 31. Goertler M., Blaser T., Guhr S., Lotze H., Heisinger J., Kropf S., et al. Reduced frequency of embolic signals in severe carotid stenosis with poststenotic flow velocity reduction. *Cerebrovasc Dis.* 2005;19:229–233.