



## Возможность использования эластографии сдвиговой волной для ультразвуковой оценки нестабильной каротидной атеросклеротической бляшки

© Куликов В.П.<sup>1\*</sup>, Аткин С.С.<sup>1,2</sup>, Козлов А.В.<sup>2</sup>, Минаков И.В.<sup>2</sup>,  
Атякшин Д.А.<sup>3</sup>, Пацап О.И.<sup>3</sup>, Игнатюк М.А.<sup>3</sup>, Трегуб П.П.<sup>3</sup>,  
Мотин Ю.Г.<sup>1,2</sup>, Пролубников М.А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Алтайский государственный медицинский университет» Минздрава России; 656038 Барнаул, пр. Ленина, 40, Российская Федерация

<sup>2</sup> КГБУЗ «Краевая клиническая больница»; 656045 Барнаул, ул. Ляпидевского, 1, Российская Федерация

<sup>3</sup> ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» Минобрнауки России; 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Российская Федерация

<sup>4</sup> ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»; 656038 Барнаул, пр. Ленина, 46, Российская Федерация

**Цель исследования:** проверка гипотезы о возможности использования ультразвуковой эластографии сдвиговой волной для оценки нестабильности атеросклеротической бляшки (АСБ) сонной артерии.

**Материал и методы.** Методом дуплексного сканирования на сканере Samsung V7 было обследовано 26 пациентов в возрасте  $69,1 \pm 6,1$  года со стенозом сонных артерий – кандидатов на реваскуляризацию. Эластографию сдвиговой волной (SWE) АСБ проводили линейным датчиком LA2-14A. Использовали множественные круговые зоны интереса различного размера для максимального захвата бляшки. После каротидной эндартерэктомии проводили гистологическое исследование АСБ, окрашенных гематоксилином. Использовали дисперсионный анализ (ANOVA).

**Результаты.** Модуль Юнга (E) АСБ сонной артерии был связан со степенью стеноза внутренней сонной артерии, наличием в бляшке богатого липидами некротического ядра (LRNC) и с ультразвуковой характеристикой типа бляшки по Geroulakos. Медианное значение показателя жесткости бляшки (E, МКР) было связано с гистологической оценкой толщины фиброзной покрышки.

**Заключение.** SWE может быть использована и перспективна для количественной оценки нестабильности каротидных атеросклеротических бляшек.

**Ключевые слова:** эластография сдвиговой волной; SWE; атеросклеротическая бляшка; нестабильная бляшка; сонная артерия

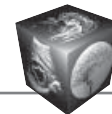
**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**

**Для цитирования:** Куликов В.П., Аткин С.С., Козлов А.В., Минаков И.В., Атякшин Д.А., Пацап О.И., Игнатюк М.А., Трегуб П.П., Мотин Ю.Г., Пролубников М.А. Возможность использования эластографии сдвиговой волной для ультразвуковой оценки нестабильной каротидной атеросклеротической бляшки. *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (2): 26–34. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1595>

Поступила в редакцию: 27.08.2025.

Принята к печати: 06.10.2025.

Опубликована online: 16.02.2026.



# Potential of using shear wave elastography for ultrasound evaluation of unstable carotid atherosclerotic plaque

© Vladimir P. Kulikov<sup>1\*</sup>, Stanislav S. Atkin<sup>1, 2</sup>, Alexey V. Kozlov<sup>2</sup>, Ilja V. Minakov<sup>2</sup>, Dmitry A. Atjakshin<sup>3</sup>, Olga I. Pacap<sup>3</sup>, Michail A. Ignatjuk<sup>3</sup>, Pavel P. Tregub<sup>3</sup>, Yuri G. Motin<sup>1, 2</sup>, Mikhail A. Prolubnikov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Altai State Medical University; 40, Lenin prosp., Barnaul 656038, Russian Federation

<sup>2</sup> Altai Regional Hospital; 1, Lyapidevsky str. Barnaul 656045, Russian Federation

<sup>3</sup> Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba; 6, Miklukho-Maklay str., Moscow 117198, Russian Federation

<sup>4</sup> Polzunov Altai State Technical University; 46, Lenina prosp., Barnaul 656038, Russian Federation

**Objective.** Testing the hypothesis about the possibility of using shear wave ultrasound elastography to assess the instability of atherosclerotic plaque in the carotid artery.

**Material and methods.** Twenty-six patients aged  $69.1 \pm 6.1$  years with carotid artery stenosis were examined using Duplex (DS) on a Samsung V7 scanner. SWE of the atherosclerotic plaque was performed with a linear LA2-14A probe. Multiple circular regions of interest (ROI) of different sizes were used to maximize plaque capture. After carotid endarterectomy (CEA), histological examination of hematoxylin-stained atherosclerotic plaques was performed. Analysis of variance (ANOVA) was used.

**Results.** Young's modulus (E) of carotid atherosclerotic plaques was associated with the degree of ICA stenosis, the presence of a lipid-rich necrotic core (LRNC) in the plaque and the ultrasound characterization of the Geroulakos plaque type. The median value of the plaque stiffness index (E, IQR) were associated with the histological assessment of the thickness of the fibrous cap.

**Conclusion.** SWE can be used and is promising for the quantitative assessment of instability of carotid atherosclerotic plaques.

**Keywords:** shear wave ultrasound elastography; SWE; atherosclerotic plaque; vulnerable plaque; carotid artery

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

**For citation:** Kulikov V.P., Atkin S.S., Kozlov A.V., Minakov I.V., Atjakshin D.A., Pacap O.I., Ignatjuk M.A., Tregub P.P., Motin Y.G., Prolubnikov M.A. Potential of using shear wave elastography for ultrasound evaluation of unstable carotid atherosclerotic plaque. *Medical Visualization*. 2026; 30 (2): 26–34. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1595>

**Received:** 27.08.2025.

**Accepted for publication:** 06.10.2025.

**Published online:** 16.02.2026.

## Введение

Ультразвуковая оценка нестабильности каротидной атеросклеротической бляшки (АСБ) широко используется для стратификации риска инсульта. Традиционно с этой целью применяют методы ультразвуковой диагностики, основанные на субъективной оценке эхоструктуры АСБ [1, 2]. В последние годы были предприняты попытки усовершенствования этих методов путем включения количественных параметров АСБ. В 2020 г. American Society of Echocardiography рекомендовало для прогнозирования риска сердечно-сосудистых событий шкалу GRADE, основанную на количественном параметре – толщине АСБ [3]. В 2023 г. была опубликована универсальная для ультразвукового исследования (УЗИ), компьютерно-томографиче-

ской и магнитно-резонансной ангиографии шкала оценки нестабильности каротидной бляшки и риска ипсилатерального инсульта Carotid Plaque-RADS [4], которая объединила толщину бляшки, как основной количественный критерий ее нестабильности с множеством качественных ультразвуковых признаков уязвимости бляшки (анэхогенные зоны, истончение покрывки, ее изъязвление, разрыв и др.).

Общепризнано, что информативность ультразвуковой оценки нестабильной каротидной бляшки можно повысить за счет использования количественных критериев. Так, в приведенных выше рекомендациях American Society of Echocardiography [3] предлагается использовать количественные методы оценки эхогенности бляшки – GSM



(gray scale median) [5] и PDA (pixel distribution analysis) [6]. В последние годы появились публикации об использовании для количественной оценки нестабильности АСБ эластографии сдвиговой волной (Shear Wave Elastography (SWE)). Количество публикаций в PubMed по этой теме возрастает год от года и исчисляется несколькими десятками (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=SHEAR+WAVE+ELASTOGRAPHY+ARTERY+PLAQUE>). Этого количества исследований пока недостаточно для рекомендаций по практическому применению SWE. Однако первые сопоставления SWE и гистологической оценки нестабильности каротидной АСБ выглядят оптимистично [7]. Авторы этого систематического обзора высказали предположение о том, что эластография в перспективе может быть самым точным и объективным методом для оценки нестабильности каротидной АСБ и стратификации риска инсульта.

**Цель исследования:** установить возможность использования эластографии сдвиговой волной для ультразвуковой оценки уязвимости каротидной атеросклеротической бляшки.

### Материал и методы

Пациенты с установленным атеросклеротическим стенозом сонных артерий – кандидаты на реваскуляризацию находились на госпитализации в отделении сосудистой хирургии в период с июля по декабрь 2024 г. и проходили предоперационное УЗИ брахиоцефальных артерий. Всего было обследовано 38 пациентов, из них 33 прооперировано, у 26 из них были получены пригодные для гистологического исследования бляшки и проведено их гистологическое исследование. Средний возраст пациентов этой группы составил  $69,1 \pm 6,1$  года.

Пациентам, отобранном для вмешательства, проводилась операция эверсионной каротидной эндартерэктомии. Материал в виде удаленной АСБ помещался хирургами *ex tempore* во флакон с раствором формалина и передавался в гистологическую лабораторию.

Всем пациентам выполнялось стандартное УЗИ экстракраниальных и интракраниальных брахиоцефальных артерий [8] на ультразвуковом сканере Samsung V7-RUS. Дуплексное сканирование экстракраниальных сосудов шеи и глазных артерий проводили мультимастотным линейным датчиком LA2-14A, транскраниальное дуплексное сканирование – секторным фазированным датчиком PA1-5A.

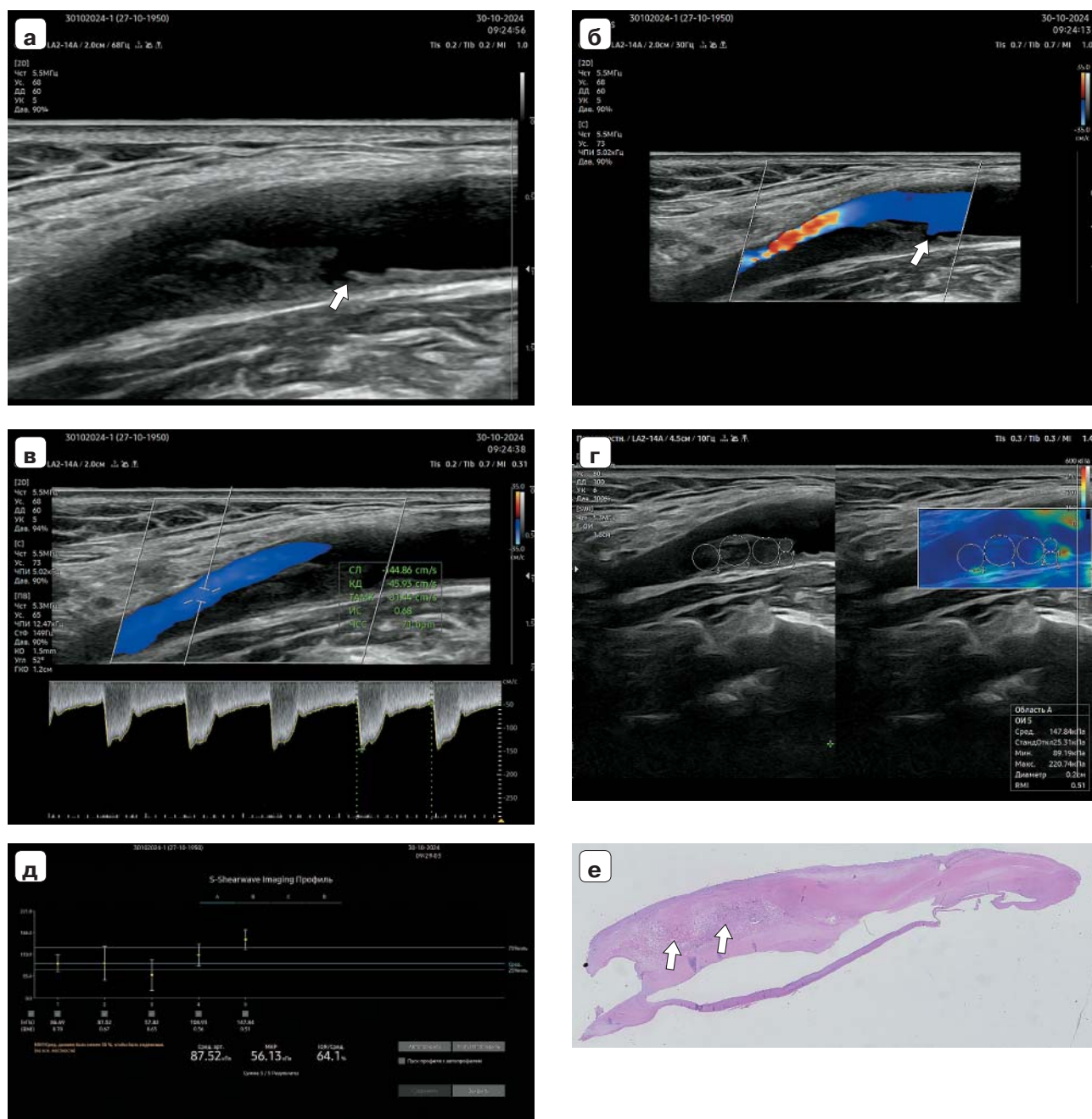
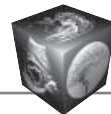
Степень стеноза внутренней сонной артерии (BCA) устанавливали гемодинамическим методом

(доплерографически) по критериям DEGUM и морфологическим методом (планиметрическим) по способу NASCET и ECST [9]. Эхоструктуру каротидных АСБ оценивали в В-режиме, распределяя их на 5 типов по модифицированной G. Geroulakos классификации Gray-Weale [1, 2].

Эластографию сдвиговой волной АСБ проводили в продольном сечении по протоколу, составленному в соответствии с рекомендациями [7, 10–12]. Использовали множественные круговые зоны интереса (ROI) различного размера для максимального захвата бляшки без расположения ROI в зоне акустических теней от кальция (рис. 1). Размеры ROI варьировали от 1 до 5 мм в зависимости от гетерогенности АСБ по эхогенности. У гомогенных бляшек использовался максимальный диаметр ROI, а у гетерогенных – минимальный для исключения попадания участков различной эхогенности в одну зону интереса. Число ROI, использованных для оценки одной бляшки, варьировало от 4 до 8 для захвата максимальной площади АСБ. У неровных и больших по площади бляшек использовалось максимальное количество круговых зон интереса, а у ровных и небольших – минимальное. Выбирали проекцию с оптимальной визуализацией АСБ в В-режиме. Затем в реальном времени включали режим SWE. После замораживания изображения включали функцию контроля качества выбранной зоны RMI (Reliable Measurement Index, индекс надежности измерения) и при помощи трекбола подбирали кадр с максимальным заполнением зоны SWE зеленым цветом на левой половине удвоенного изображения. В меню выбирали тип измерения “круг” и размещали ROI в проекции бляшки, как описано выше (рис. 1г). Затем активировали в меню “измерение эластичности” и переходили в раздел “профиль” с графическим отображением разброса измерений эластичности между выбранными ROI, а также численным выражением среднего (сред.) и медианного (МКР) значений модуля Юнга в кПа и значением разброса измерений среднего (интерквартильный размах (IQR)) в % (рис. 1д).

Все УЗИ проводил один специалист, прошедший дополнительное обучение работе на использованной модели сканера. Все протоколы экспертировались другим специалистом на предмет соответствия исследования требованиям протокола.

Гистологическое исследование каротидных АСБ, фиксированных 10% раствором формалина с буфером, проводили по стандартной методике (гистопроцессинг с использованием раствора для гистологической проводки на основе изопропилового спирта), далее парафиновые блоки

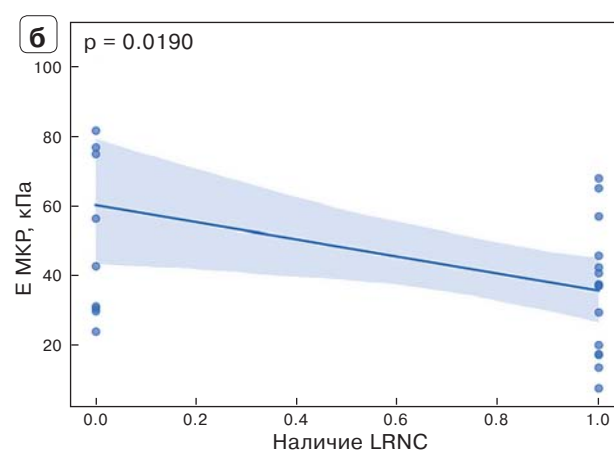
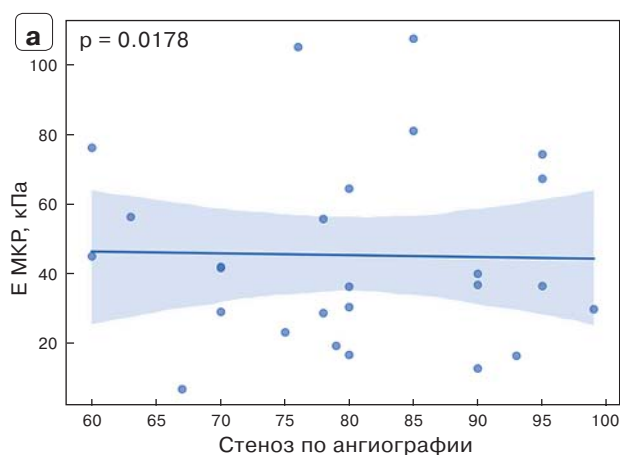


**Рис. 1.** Ультразвуковая и гистологическая характеристика АСБ в синусе левой ВСА пациента Т., 73 года.

**а** – В-режим: гомогенная гипоехогенная АСБ, толщина 4,9 мм, протяженность 29,1 мм, покрышка тонкая, разрыв фиброзной капсулы более 1 мм (стрелка), тип 1 по Geroulakos, Plaque-RADS 4в; **б** – режим ЦДК: элайзинг в зоне стеноза и затекание крови в область разрыва фиброзной капсулы (стрелка); **в** – доплерограмма в зоне стеноза, ПСС 145 см/с, КО 2, стеноз по гемодинамике 50–59%; **г** – эластография АСБ; **д** – количественные результаты эластографии АСБ; **е** – гистология, окраска гематоксилином и эозином,  $\times 200$ : фиброзная покрышка толщина 20% от толщины бляшки, липидное ядро 70% от площади бляшки, скопления фибриноидного колликативного некроза (стрелки).

**Fig. 1.** Ultrasound and histological characteristics of atherosclerotic plaque in the sinus of the left internal carotid artery of patient T., 73 years old.

**а** – B-mode: homogeneous hypoechoic atherosclerotic plaque, thickness 4.9 mm, length 29.1 mm, thin cap, fibrous capsule rupture more than 1 mm (arrow), type 1 according to Geroulakos, Plaque-RADS 4b; **б** – color Doppler mode: elating in the stenosis area and blood leakage into the area of fibrous capsule rupture (arrow); **в** – dopplerogram in the stenosis area, PSS 145 cm/s, KO 2, hemodynamic stenosis 50–59%; **г** – atherosclerotic plaque elastography; **д** – quantitative results of atherosclerotic plaque elastography; **е** – histology, hematoxylin and eosin staining,  $\times 200$ : fibrous cap thickness 20% of plaque thickness, lipid core 70% of plaque area, accumulations of fibrinoid colluvative necrosis (arrows).

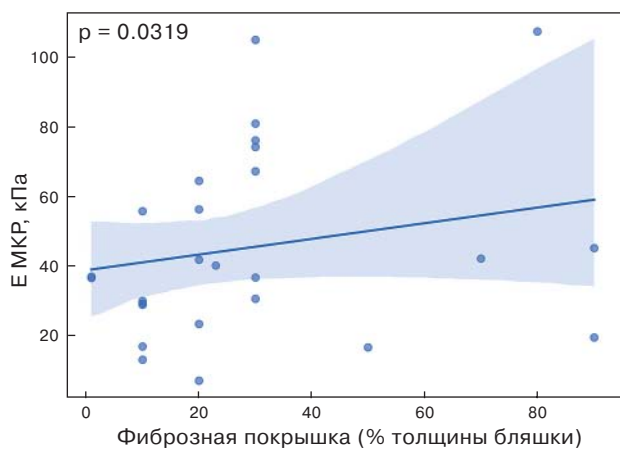
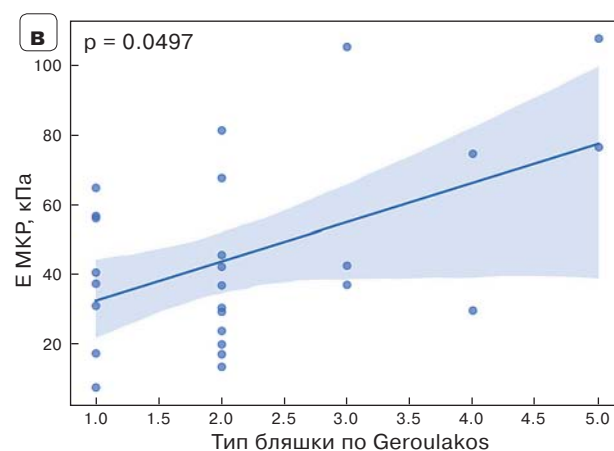


**Рис. 2.** Связи эластографической оценки жесткости (модуль Юнга, E) с основными характеристиками каротидных АСБ.

Медианное значение модуля Юнга (E, МКР) по данным SWE и степень стеноза ВСА (%) по данным ангиографии (а); наличие в бляшке богатого липидами некротического ядра (LRNC) по данным УЗИ (б); тип бляшки по ультразвуковой классификации Geroulakos (в).

**Fig. 2.** Relationships between elastographic assessment of stiffness (Young's modulus, E) and the main characteristics of carotid atherosclerotic plaques.

Median value of Young's Modulus (E, ICR) according to SWE data and the degree of ICA stenosis (%) according to angiography data (a); presence of lipid-rich necrotic core (LRNC) in the plaque according to ultrasound data (б); plaque type according to Geroulakos ultrasound classification (в).



**Рис. 3.** Связь эластографической оценки жесткости (модуль Юнга, E) с гистологической оценкой фиброзной покрышки каротидных АСБ.

**Fig. 3.** Relationship between elastographic assessment of stiffness (Young's modulus, E) and histological assessment of the fibrous cap of carotid atherosclerotic plaques.

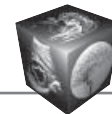
подвергали микротомии со срезами толщиной 3 мкм, окрашивали гематоксилином Джилла и эозином водно-спиртовым, 1%,  $\times 200$ .

Статистический анализ данных проводили с помощью Statistica 10 (StatSoft, США). Для установления статистически значимых различий между средними значениями использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Статистическая значимость определялась при  $p < 0,05$ .

### Результаты исследования

По данным дисперсионного анализа модуль Юнга (E) АСБ сонной артерии, измеренный методом SWE, был связан со степенью стеноза ВСА, наличием в бляшке богатого липидами некротического ядра (LRNC) и с ультразвуковой характеристикой типа бляшки по Geroulakos (рис. 2).

Медианное значение жесткости бляшки (E, МКР) было связано с гистологической оценкой толщины фиброзной покрышки бляшки (рис. 3).



## Обсуждение

Целью этого исследования была проверка гипотезы о возможности использования ультразвуковой эластографии сдвиговой волной для оценки нестабильности АСБ сонной артерии. Все больше данных свидетельствует о важности неинвазивной оценки уязвимости (нестабильности) каротидной АСБ для стратификации риска ипсилатерального атеротромботического ишемического инсульта [4, 7, 13]. Однако ультразвуковая оценка нестабильной АСБ, как правило, проводится качественно по эхогенности на основе субъективной оценки интенсивности и равномерности отражения бляшковой ультразвука в соответствии с классификацией Gray-Weale [1] в модификации Geroulakos [2]. В опубликованном недавно систематическом обзоре [13], посвященном гистологической верификации ультразвуковой характеристики каротидных бляшек, на основании анализа 63 статей был сделан вывод об отсутствии тенденции к увеличению точности традиционных методов УЗИ за последние 40 лет (1982–2021). Перспективы повышения точности УЗИ для оценки нестабильности каротидной бляшки связывают с новыми количественными методами, среди которых SWE рассматривается как один из наиболее перспективных [7].

В SWE силовой импульс акустического излучения (acoustic radiation force impulse, ARFI) используется для создания сдвиговой волны [14]. Эта сдвиговая волна распространяется перпендикулярно силовому импульсу, а ее скорость напрямую связана с эластичностью ткани, выражаемой модулем Юнга [15]. Чем жестче ткань, тем выше модуль Юнга. Поскольку он значительно ниже для липидной ткани, чем для фиброзной [16], SWE может быть потенциально пригодной для обнаружения уязвимых бляшек. Опубликованные к настоящему времени результаты исследований подтвердили это предположение. Индексы SWE, в основном модуль Юнга, были надежны для оценки структуры каротидной бляшки по сравнению с любыми референсными методами, включая гистологию [7, 13, 17].

Наше исследование также показало наличие значимых связей модуля Юнга каротидной АСБ, измеренного методом SWE, с важными количественными ангиографическими, ультразвуковыми и гистологическими критериями ее нестабильности. Прежде всего, речь идет о связи жесткости бляшки со степенью стеноза ВСА, так как степень стеноза ВСА остается основным количественным критерием риска атеротромботического ишемического инсульта [4]. Аналогичные результаты были получены в исследовании K. Ramnarine и соавт. [18], обнаруживших более низкий модуль Юнга

в бляшках у пациентов с более высокой степенью стеноза. Эти результаты подчеркивают значимость размера бляшки и соответственно степени стеноза ВСА для прогрессирования ее уязвимости и увеличения риска атеротромбоза.

Важно, что результаты ANOVA показали значимую связь модуля Юнга SWE и ультразвукового типирования бляшки по Geroulakos. Несмотря на очевидную низкую мощность выборки по типам бляшки 3–5, модуль Юнга нестабильных бляшек (типы 1, 2) был значимо меньше, чем модуль Юнга более стабильных бляшек (типы 3–5). С одной стороны, более чем 30-летнее использование этой субъективной шкалы вряд ли было бы возможно без ее реальной связи с объективной реализацией прогноза по нестабильной бляшке. С другой стороны, эта связь вселяет надежду на увеличение диагностической информативности УЗИ за счет внедрения количественной характеристики жесткости бляшки по SWE.

Аналогично можно трактовать связь модуля Юнга с выявлением при УЗИ скопления липидов в бляшке (LRNC). Модуль Юнга был ниже в бляшках, содержащих LRNC, по сравнению с бляшками без ультразвуковых признаков LRNC. Эти данные согласуются с результатами исследования, показавшего, что модуль Юнга значительно ниже для липидной ткани, чем для фиброзной [16]. Известно, что ультразвук хорошо выявляет скопления липидов и кровоизлияние в бляшку, но не может дифференцировать эти разные по природе и значимости для прогноза патологические процессы [4]. Наши результаты позволяют надеяться, что использование SWE может улучшить возможности УЗИ для такой дифференцировки.

Модуль Юнга был связан с гистологической оценкой толщины фиброзной покрышки бляшки, возрастая с увеличением ее толщины. Учитывая жесткость фиброзной ткани, именно толщина фиброзной покрышки существенно влияет на жесткость бляшки и лимитирует ее разрыв с выбросом в кровоток тромбогенного содержимого и атеротромбоз мозговых артерий. T. Czernuszewicz и соавт. [19] показали, что ультразвуковая эластография сдвиговой волной способна различать мягкие и жесткие компоненты АСБ, верифицированные гистологически, а точность диагностики возрастает с включением в оценку толщины фиброзной капсулы.

Пока немногочисленные исследования, включающие всего несколько десятков оригинальных работ, из которых примерно 15 работ использовали гистологическую верификацию уязвимой бляшки, однозначно свидетельствуют о перспективности использования ультразвуковой SWE для



количественной оценки нестабильности каротидных АСБ, превосходящей ее традиционную оценку по эхогенности. Помимо малого числа исследований, существенным ограничением для практического применения SWE каротидных бляшек является отсутствие стандартизации методики. Наиболее часто используется оценка модуля Юнга методом K. Ramnarine и соавт. [18] с круговыми ROI, как было и в нашей работе (см. рис. 1г). Однако область анализа в исследованиях варьировала от нескольких ROI в 1–2 мм до оконтуривания всей бляшки, что может быть одной из причин различий в измеренных значениях жесткости бляшки [7]. Кроме того, использование круговых ROI различается в клиническом применении от прицельного размещения в отдельных участках бляшки до заполнения максимального размера бляшки, как в нашей работе. Существуют противоречия в рекомендациях по проведению SWE в продольном или поперечном сечении бляшки, хотя большинство, как и в нашей работе, использует продольное сечение [7]. Подчеркивается, что, с одной стороны, SWE наиболее чувствительна к кальцификации бляшки, но, с другой стороны, кальций затрудняет проведение исследования [7]. Учитывая это, мы не размещали ROI на участках бляшки, которые находились в зоне затенения от кальция. Безусловно, нужны исследования, которые бы обосновали и стандартизовали методику применения SWE для оценки уязвимости каротидной бляшки. Также для практического использования SWE пока недостаточно данных для выработки разграничительных количественных критериев оценки нестабильной бляшки. Однако результаты, в том числе и нашего исследования, позволяют надеяться на скорое устранение препятствий для клинического применения SWE.

Ограничением настоящей работы является небольшой размер выборки. Это ограничение преодолимо по мере увеличения соответствующих исследований, число которых прогрессивно возрастает. Еще одно важное ограничение – отсутствие стандартизованного протокола SWE. К сожалению, это трудно преодолимое ограничение для всех новых методов или новых областей применения даже стандартизованных методик. Преодолеть это ограничение без проведения специальных сравнительных методических исследований невозможно. И на их проведение понадобится достаточно много времени.

## Заключение

Ультразвуковая оценка жесткости атеросклеротических бляшек сонной артерии методом эластографии сдвиговой волной (SWE) связана со степе-

нью стеноза внутренней сонной артерии и гистологической оценкой толщины фиброзной покрышки бляшки.

Модуль Юнга, измеренный методом SWE, связан с ультразвуковой оценкой наличия в бляшке богатого липидами некротического ядра (LRNC) и ультразвуковым типированием каротидных бляшек по эхогенности и риску инсульта по Geroulakos.

Эластография сдвиговой волной может быть использована и перспективна для количественной оценки нестабильности каротидных атеросклеротических бляшек.

## Финансирование

Работа выполнена при поддержке компании ЗАО Медиэйс по договору НИР № 1-2024МБ от 19.07.2024 с Алтайским государственным медицинским университетом.

## Funding

This work was supported by Mediays CJSC under R&D contract No. 1-2024MB dated July 19, 2024, with the Altai State Medical University.

## Участие авторов

Куликов В.П. – концепция и дизайн исследования, проведение исследования, обзор публикаций по теме статьи, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка и редактирование текста, утверждение окончательного варианта статьи.

Аткин С.С. – проведение исследования, сбор и обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка и редактирование текста.

Козлов А.В. – проведение исследования.

Минаков И.В. – проведение исследования.

Атякшин Д.А. – анализ и интерпретация полученных данных, участие в научном дизайне.

Пацап О.И. – проведение исследования, сбор и обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных.

Игнатюк М.А. – проведение исследования.

Трегуб П.П. – анализ и интерпретация полученных данных, участие в научном дизайне.

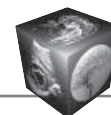
Мотин Ю.Г. – анализ и интерпретация полученных данных, участие в научном дизайне.

Пролубников М.А. – статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных.

## Authors' participation

Kulikov V.P. – concept and design of the study, conducting research, review of publications, analysis and interpretation of the obtained data, text preparation and editing, approval of the final version of the article.

Atkin S.S. – conducting research, collection and analysis of data, analysis and interpretation of the obtained data, text preparation and editing.



Kozlov A.V. – conducting research.

Minakov I.V. – conducting research.

Atjakshin D.A. – analysis and interpretation of the obtained data, participation in scientific design.

Pacap O.I. – conducting research, collection and analysis of data, analysis and interpretation of the obtained data.

Ignatjuk M.A. – conducting research.

Tregub P.P. – analysis and interpretation of the obtained data, participation in scientific design.

Motin Y.G. – analysis and interpretation of the obtained data, participation in scientific design.

Prolubnikov M.A. – statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data.

## Список литературы [References]

- Gray-Weale A.C., Graham J.C., Burnett J.R. et al. Carotid artery atheroma: comparison of preoperative B-mode ultrasound appearance with carotid endarterectomy specimen pathology. *J. Cardiovasc. Surg.* 1988; 29 (6): 676–681.
- Geroulakos G., Ramaswami G., Nicolaides A. et al. Characterisation of symptomatic and asymptomatic carotid plaque using high-resolution real-time ultrasonography. *Br. J. Surg.* 1993; 80 (10): 1274–1277. <https://doi.org/10.1002/bjs.1800801016>
- Johri A.M., Nambi V., Naqvi T.Z. et al. Recommendations for the Assessment of Carotid Arterial Plaque by Ultrasound for the Characterization of Atherosclerosis and Evaluation of Cardiovascular Risk: From the American Society of Echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2020; 33 (8): 917–933. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2020.04.021>
- Saba L., Cau R., Murgia A. et al. Carotid Plaque-RADS. A Novel Stroke Risk Classification System. *Cardiovasc. Imaging.* 2024; 17 (1): 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2023.09.005>
- El-Barghouty N., Geroulakos G., Nicolaides A. et al. Computer-Assisted Carotid Plaque Characterisation. *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.* 1995; 9: 389–393. [https://doi.org/10.1016/s1078-5884\(05\)80005-x](https://doi.org/10.1016/s1078-5884(05)80005-x)
- Lal B.K., Hobson R.W., Pappas P.J., Kubicka R. Pixel distribution analysis of B-mode ultrasound scan images predicts histologic features of atherosclerotic carotid plaques. *J. Vasc. Surg.* 2002; 35 (6): 1210–1217. <https://doi.org/10.1067/mva.2002.122888>
- Pruijssen J.N., de Korte C., Voss I., Hansen H. Vascular Shear Wave Elastography in Atherosclerotic Arteries: A Systematic Review. *Ultrasound Med. Biol.* 2020; 46 (9): 2145–2163. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2020.05.013>
- IAC Standards and Guidelines for Vascular Testing Accreditation (Published June 1, 2023). 2023. Intersocietal Accreditation Commission. 70 p.
- Naylor R., Rantner B., Ancetti S. et al. European Society for Vascular Surgery (ESVS) 2023 Clinical Practice Guidelines on the Management of Atherosclerotic Carotid and Vertebral Artery Disease. *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.* 2023; 65 (1): 7–111. <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2022.04.011>
- Filho P., Bertanha M., Jaldin R. et al. Shear wave elastography for extracranial carotid atherosclerotic plaques: technical principles and how to do it Elastografia por cisalhamento (shear wave) para placas ateroscleróticas carotídeas extracranianas: princípios técnicos e como realizar. *J. Vasc. Bras.* 2023; 22: e20220082. <https://doi.org/10.1590/1677-5449.202200822>
- Goudot G., Sitruk J., Jimenez A. et al. Carotid Plaque Vulnerability Assessed by Combined Shear Wave Elastography and Ultrafast Doppler Compared to Histology. *Transl. Stroke Res.* 2022; 13 (1): 100–111. <https://doi.org/10.1007/s12975-021-00920-6>
- Skoloudik D., Kesnerova P., Vomacka J. et al. Shear-Wave Elastography Enables Identification of Unstable Carotid Plaque. *Ultrasound Med. Biol.* 2021; 47 (7): 1704–1710. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2021.03.026>
- Pakizer D., Kozel J., Elmers J. et al. Histologically Verified Carotid Plaque Characteristics by Ultrasound: A Diagnostic Accuracy Systematic Review. *Ultrasound Med. Biol.* 2025; 51 (10): 1646–1659. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2025.07.001>
- Sarvazyan A.P., Rudenko O.V., Swanson S.D. et al. Shear wave elasticity imaging: A new ultrasonic technology of medical diagnostics. *Ultrasound Med. Biol.* 1998; 24 (9): 1419–1435. [https://doi.org/10.1016/s0301-5629\(98\)00110-0](https://doi.org/10.1016/s0301-5629(98)00110-0)
- Bamber J., Cosgrove D., Dietrich C. et al. EFSUMB guidelines and recommendations on the clinical use of ultrasound elastography: Part 1. Basic principles and technology. *Ultraschall Med.* 2013; 34 (2): 169–184. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1335205>
- Chai C., Akyildiz A., Speelman L. et al. Local axial compressive mechanical properties of human carotid atherosclerotic plaques – Characterisation by indentation test and inverse finite element analysis. *J. Biomech.* 2013; 46 (10): 1759–1766. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.03.017>
- Davidhi A., Rafailidis V., Destanis E. et al. Ultrasound Elastography: another piece in the puzzle of carotid plaque vulnerability? *Med. Ultrason.* 2022; 24 (3): 356–363. <https://doi.org/10.11152/mu-3190>
- Ramnarine K.V., Garrard J.W., Kanber B. et al. Shear wave elastography imaging of carotid plaques: Feasible, reproducible and of clinical potential. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2014; 12: 49. <https://doi.org/10.1186/1476-7120-12-49>
- Czernuszewicz T., Homeister J., Caughey M. et al. Performance of acoustic radiation force impulse ultrasound imaging for carotid plaque characterization with histologic validation. *J. Vasc. Surg.* 2017; 66 (6): 1749–1757.e3. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2017.04.043>



**Для корреспонденции\*:** Куликов Владимир Павлович – e-mail: kulikov57@mail.ru

**Куликов Владимир Павлович** – доктор мед. наук, профессор, заведующий кафедрой ультразвуковой и функциональной диагностики ФГБОУ ВПО “Алтайский государственный медицинский университет” Минздрава России, Барнаул. <https://orcid.org/0000-0003-4869-5465>

**Аткин Станислав Сергеевич** – заведующий отделением функциональной диагностики КГБУЗ “Краевая клиническая больница”; ассистент кафедры ультразвуковой и функциональной диагностики с курсом ДПО ФГБОУ ВПО “Алтайский государственный медицинский университет” Минздрава России, Барнаул. <https://orcid.org/0009-0000-6744-7307>

**Козлов Алексей Витальевич** – канд. мед. наук, врач сердечно-сосудистый хирург, заведующий отделением сосудистой хирургии КГБУЗ “Краевая клиническая больница”, Барнаул. <https://orcid.org/0009-0005-9712-7650>

**Минаков Илья Викторович** – врач сердечно-сосудистый хирург отделения сосудистой хирургии КГБУЗ “Краевая клиническая больница”, Барнаул. <https://orcid.org/0009-0007-4888-9004>

**Атякшин Дмитрий Андреевич** – доктор мед. наук, директор научно-образовательного ресурсного центра “Инновационные технологии иммунофенотипирования, цифрового пространственного профилирования и ультраструктурного анализа” ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы” Минобрнауки России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-8347-4556>

**Пацап Ольга Игоревна** – канд. мед. наук, младший научный сотрудник научно-образовательного ресурсного центра “Инновационные технологии иммунофенотипирования, цифрового пространственного профилирования и ультраструктурного анализа” ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы” Минобрнауки России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-4620-3922>

**Игнатюк Михаил Александрович** – младший научный сотрудник научно-образовательного ресурсного центра “Инновационные технологии иммунофенотипирования, цифрового пространственного профилирования и ультраструктурного анализа” ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы” Минобрнауки России, Москва. <https://orcid.org/0009-0007-3552-5551>

**Трегуб Павел Павлович** – доктор мед. наук, старший научный сотрудник ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы” Минобрнауки России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-3650-6121>

**Мотин Юрий Григорьевич** – доктор мед. наук, врач-патологоанатом КГБУЗ “Краевая клиническая больница”; профессор ФГБОУ ВО “Алтайский государственный медицинский университет” Минздрава России, Барнаул. <https://orcid.org/0000-0003-4282-6401>

**Пролубников Михаил Александрович** – аспирант ФГБОУ ВО “Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова”, Барнаул. <https://orcid.org/0009-0004-4370-4961>

**Contact\*:** Vladimir P. Kulikov – e-mail: kulikov57@mail.ru

**Vladimir P. Kulikov** – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of Ultrasound and Functional Diagnostic Department, Altai State Medical University, Barnaul. <https://orcid.org/0000-0003-4869-5465>

**Stanislav S. Atkin** – Head of the Functional Diagnostics Department, Altai Regional Hospital; Assistant Professor of Ultrasound and Functional Diagnostic Department, Altai State Medical University, Barnaul. <https://orcid.org/0009-0000-6744-7307>

**Alexey V. Kozlov** – Cand. of Sci. (Med.), Head of Vascular Surgery Department, Altai Regional Hospital, Barnaul. <https://orcid.org/0009-0005-9712-7650>

**Ilya V. Minakov** – cardiovascular surgeon of the vascular surgery department, Altai Regional Hospital, Barnaul. <https://orcid.org/0009-0007-4888-9004>

**Dmitry A. Atjakshin** – Doct. of Sci. (Med.), Director of the Scientific and Educational Resource Center “Innovative Technologies of Immunophenotyping, Digital Spatial Profiling and Ultrastructural Analysis”, Peoples’ Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-8347-4556>

**Olga I. Pacap** – Cand. of Sci. (Med.), Junior research fellow, Scientific and Educational Resource Center “Innovative Technologies of Immunophenotyping, Digital Spatial Profiling and Ultrastructural Analysis”, Peoples’ Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-4620-3922>

**Michail A. Ignatjuk** – Junior research fellow, Scientific and Educational Resource Center “Innovative Technologies of Immunophenotyping, Digital Spatial Profiling and Ultrastructural Analysis”, Peoples’ Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow. <https://orcid.org/0009-0007-3552-5551>

**Pavel P. Tregub** – Doct. of Sci. (Med.), Senior research fellow, Peoples’ Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-3650-6121>

**Yuri G. Motin** – Doct. of Sci. (Med.), pathologist, Pathomorphology Department, Altai Regional Hospital; Professor of Altai State Medical University, Barnaul. <https://orcid.org/0000-0003-4282-6401>

**Mikhail A. Prolubnikov** – Graduate Student, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul. <https://orcid.org/0009-0004-4370-4961>