



УДК 616.132.2

DOI 10.17802/2306-1278-2024-13-2-101-115

КАЛЬЦИНОЗ КОРОНАРНЫХ АРТЕРИЙ: РОЛЬ ВИЗУАЛИЗИРУЮЩИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ, СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ЛЕЧЕНИЯ

А.Ю. Цыденова, А.А. Баранов, Р.А. Найденов, Р.У. Ибрагимов, Д.С. Гранкин,
О.В. Крестьянинов

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, ул. Речкуновская, 15, Новосибирск, Российская Федерация, 630055

Основные положения

- В обзоре описано современное состояние диагностики и лечения кальциноза коронарных артерий.

Резюме

Кальциноз коронарных артерий встречается примерно в одной трети всех поражений коронарных артерий у пациентов с ишемической болезнью сердца и остается сложной проблемой в интервенционной кардиологии по причине технических трудностей проведения любого вида реваскуляризации. Так, чрескожное коронарное вмешательство при кальцинозе коронарных артерий при сравнении с результатами лечения пациентов без кальциноза артерий ассоциировано с высоким риском периоперационных осложнений, неблагоприятными сердечно-сосудистыми событиями в раннем и отдаленном периодах наблюдения. Одним из наиболее важных предикторов благоприятного исхода после имплантации стента с лекарственным покрытием является оптимальная площадь поперечного сечения стента. Внутрисосудистая визуализация, которая играет существенную роль в определении характера поражения, выборе инструмента и оптимизации имплантации стента, современные методы модификации кальциноза, а также их сочетание, возможно, приведут к лучшему процедурному успеху и отдаленным результатам.

Ключевые слова

Кальциноз коронарных артерий • Ротационная атерэктомия • Баллонная ангиопластика • Режущий баллон • Чрескожное коронарное вмешательство • Реваскуляризация

Поступила в редакцию: 18.04.2024; поступила после доработки: 05.05.2024; принята к печати: 10.06.2024

CORONARY ARTERY CALCIFICATION: INTRACORONARY IMAGING, CONTEMPORARY TECHNOLOGIES OF TREATMENT

A.Yu. Tsydenova, A.A. Baranov, R.A. Naydenov, R.U. Ibragimov, D.S. Grankin,
O.V. Krestyaninov

Federal State Budgetary Institution "Meshalkin National Medical Research Center" of the Ministry of Health of Russian Federation, 15, Rechkunovskaya St., Novosibirsk, Russian Federation, 630055

Highlights

- This review presents current state-of-the-art of diagnosis and treatment of coronary artery calcification.

Abstract

Coronary artery calcification occurs in about one third of all coronary artery lesions in patients with coronary artery diseases and is a problem in interventional cardiology due to technical difficulties. Percutaneous coronary intervention for coronary artery calcification is associated with a high risk of perioperative complications, adverse cardiovascular events in early and long-term follow-up compared with the results of treatment of patients without arterial calcification. One of the most important predictors of a favorable outcome after implantation

Для корреспонденции: Арюна Юрьевна Цыденова, chgmaryuna@mail.ru; адрес: ул. Речкуновская, 15, Новосибирск, Российская Федерация, 630055

Corresponding author: Aryuna Yu. Tsydenova, chgmaryuna@mail.ru; address: 15, Rechkunovskaya St., Novosibirsk, Russian Federation, 630055

of a drug-eluting stent is the optimal cross-sectional area of coronary stent. Intravascular imaging plays an important role in lesion assessment, selection of instruments and optimization of stent implantation, contemporary technologies modification of severe coronary artery calcification, as well as their combination, will probably lead to better procedural success and long-term results.

Keywords

Coronary artery calcification • Rotational atherectomy • Balloon angioplasty • Cutting balloon • Percutaneous coronary intervention • Revascularization

Received: 18.04.2024; received in revised form: 05.05.2024; accepted: 10.06.2024

Список сокращений

ВСУЗИ – внутрисосудистое ультразвуковое исследование
КА – коронарные артерии

ОКТ – оптическая когерентная томография
ЧКВ – чрескожное коронарное вмешательство

Введение

Чрескожное коронарное вмешательство (ЧКВ) при кальцинозе коронарных артерий (КА) ассоциировано с высоким риском периоперационных осложнений, неблагоприятными сердечно-сосудистыми событиями в раннем и отдаленном периодах по сравнению с вмешательствами на некальцинированных поражениях [1].

Достижение оптимального расширения стента имеет важное значение во время проведения ЧКВ при кальцинозе КА, поэтому основной задачей является модификация кальцинированного поражения [2]. На современном этапе различают механические и физические методы подготовки кальцинированного участка поражения коронарных артерий, предваряющие стентирование. Среди физических методов наряду со стандартной баллонной ангиопластикой используют баллоны высокого давления, режущие баллоны, ротационную и орбитальную атерэктомию. К физическим методам воздействия относят эксимерную лазерную атерэктомию, внутрисосудистую коронарную литотрипсию.

Вопросы диагностики кальциноза КА также окончательно не решены. Кальциноз КА чаще всего недооценивается на двухмерных изображениях, получаемых при коронарной ангиографии. Последняя имеет ограничения при определении степени кальциноза (в оценке оптимальности имплантации стента), тогда как внутрисосудистые методы визуализации позволяют более полноценно описать характер кальцинированного поражения, содействуют выбору того или иного метода вмешательства, кроме того, предоставляют возможность контроля технических результатов имплантации стента. Возможности внутрисосудистых методов визуализации позволяют добиться оптимизации выбора лечебных процедур и, таким образом, играют значительную роль в повышении эффективности лечения пациентов с кальцинозом КА.

В данном обзоре обсуждаются распространенность, патогенез и диагностика кальциноза КА,

роль внутрисосудистой визуализации, а также спектр современных методов лечения.

Распространенность

По данным крупных регистров и метаанализов, распространенность умеренных и тяжелых кальцинированных поражений КА составляет 18–26% у пациентов с ишемической болезнью сердца [3, 4]. Риск развития кальциноза КА увеличивается у лиц с артериальной гипертензией, ожирением, сахарным диабетом, гиперлипидемией, заболеваниями, способствующими увеличению выработки фибриногена, повышенным уровнем С реактивного белка, хроническими заболеваниями почек. F. Wang и соавт. (2018) сообщили о наличии кальциноза КА более чем у 90% мужчин и 67% женщин в возрастной когорте старше 70 лет [5]. Естественное старение населения, увеличение продолжительности жизни и связанный с этим рост пациентов с коморбидной патологией предполагает высокую частоту обращения таких больных в ближайшем будущем.

Патогенез

Атеросклероз и кальциноз артерий – взаимозависимые патологические процессы. Атеросклероз на всех этапах в той или иной форме сопровождается нарушениями фосфорно-кальциевого обмена и отложением кальция в интиму либо медию артерии [6]. Кальцификация интимы, которая является доминирующим типом кальциноза КА, управляется хондроцитоподобными клетками и тесно связана с экспрессией цитокинов тканевыми макрофагами и пенистыми клетками, которые способны к усиленному захвату ионов кальция [7]. В настоящее время механизм кальцификации артерий детально описан у пациентов с хронической болезнью почек: уремические токсины увеличивают минерализацию гладкомышечных клеток сосудов, тем самым вызывая выделение остеооптина независимо от концентрации фосфатов, который выступает независимым фактором риска сердечно-сосудистых событий [8].

При этом в настоящее время не существует единого мнения, является ли кальцификация артерий окончательной стадией атеросклероза или кальциноз КА представляет собой только часть процесса формирования атеросклеротической бляшки.

Коронарный кальциноз как предиктор неблагоприятных событий

Кальциноз КА выступает маркером выраженно-го атеросклероза, включая протяженные поражения, хронические тотальные окклюзии, бифуркационные стенозы, и коррелирует с многососудистым поражением коронарных артерий. Кальциноз КА считается предиктором неблагоприятного клинического исхода, связанного с более высокой смертностью и серьезными сердечно-сосудистыми событиями [9].

ЧКВ на кальцинированных поражениях ассоциировано с недостаточным расправлением стента и мальпозицией, серьезными перипроцедурными осложнениями и, как следствие, с высокой частотой рестеноза или тромбоза. В оптимальной имплантации стента важную роль играет подготовка кальцинированного сегмента с помощью различных устройств и методик [10]. Известно, что оптимальная имплантация стента под контролем визуализирующих методов диагностики, определяемая как площадь поперечного сечения стента $> 5,5 \text{ мм}^2$, достигается только примерно в 50% поражений, а с тяжелыми кальцинированными поражениями труднее получить оптимальные конечные результаты [11]. Следовательно, ключевую роль в улучшении результатов ЧКВ играют внутрисосудистые методы визуализации, предоставляющие ценную информацию, которая может быть использована для оптимизации имплантации стента и снижения количества осложнений [12]. Предварительное измерение диаметра сосуда, визуализация поражения и определение его характеристик обуславливают выбор конкретной методики лечения или их комбинации, обеспечивая адекватную подготовку кальцинированного поражения. Непосредственно после имплантации стента внутрисосудистые методы визуализации позволяют оценить результат и принять меры по оптимизации ЧКВ.

Диагностика

За последние годы накопилось достаточное количество данных о том, что наличие кальциноза КА считается диагностически важной характеристикой пациентов с ишемической болезнью сердца. Кальциноз КА является маркером тяжести коронарного атеросклероза, наличия коморбидной патологии и неблагоприятного исхода заболевания. Важность обнаружения кальциноза КА с помощью различных методов диагностики наглядно проявляется при выборе оптимального метода реваскуляризации миокарда.

КТ-ангиография – неинвазивный метод визуализации кальциноза КА, позволяющий оценить степень и распространенность кальциноза путем расчета кальциевого индекса, который определяется как область площадью не менее $1 \text{ мм}^2 > 130$ единиц Хаунсфилда или ≥ 3 единиц с использованием методики Агатстона [13]. Кальциевый индекс является математической производной площади кальцинатов на каждом последовательном томографическом срезе и фактора его рентгеновской плотности. Общий балл кальциевого индекса в единицах Агатстона (AU) формируется суммированием баллов каждого очага кальцификации по всем коронарным артериям. Соответственно, выделяют четыре степени кальциноза КА: минимальный (1–10 AU), средний (11–100 AU), умеренный (101–400 AU) и выраженный ($> 400 \text{ AU}$). Доказано, что кальциевый индекс тесно связан с тяжестью коронарного атеросклероза и риском развития острых коронарных событий у бессимптомных пациентов [14]. КТ-ангиография КА позволяет оценить анатомию коронарного русла, характер поражения, характеристику бляшки, выявить пятнистую кальцификацию, включения микрокальцинатов. Данный метод позволяет рассчитать кальциевый индекс в коронарных артериях как независимый предиктор коронарных событий у лиц без симптомов, так и у симптомных пациентов, что подтверждено в 10-летнем многоэтническом исследовании атеросклероза (MESA) [15]. КТ-ангиография позволяет определить процент вовлеченности коронарных артерий в процесс кальцификации, так называемый показатель охвата кальцием, а также охарактеризовать тяжесть атеросклеротического поражения, однако не дает достаточной информации о глубине расположения кальция, вовлеченности слоев сосудистой стенки. Таким образом, КТ-ангиография не является основным методом диагностики в планировании вмешательства.

Коронарная ангиография считается «золотым стандартом» определения поражения коронарного русла, но двухмерное изображение не позволяет полноценно определить размер сосуда, характеристику бляшки, информацию об имплантированном стенте. Умеренный кальциноз визуализируется в виде рентгеноконтрастных теней, которые формируют силуэт артерии еще до введения контрастного вещества при динамическом изображении, тогда как выраженный кальциноз визуализируется на статичном изображении (рис. 1). Е.М. Tuzsi и коллеги, изучая сопоставимость данных коронарной ангиографии и внутрисосудистого ультразвукового исследования (ВСУЗИ), предложили оценивать кальциноз КА по четырем критериям: 1) оценка по 4-балльной шкале (0 – нет кальциноза, 1 – кальциноз едва заметен, 2 – видимый кальциноз, 3 – выра-

женный кальциноз); 2) глубина кальциноза после инъекции контрастного вещества (поверхностный расположен ближе к просвету сосуда, глубокий – на уровне адвентиции); 3) достоверное определение кальциноза в двух и более ортогональных проекциях; 4) наличие диффузного кальциноза КА [16].

Значимость коронарной ангиографии для оценки размера сосуда не является высокой: согласно исследованию OPUS-CLASS, диаметр просвета, определенный при коронарной ангиографии, был на 5% меньше истинного размера, чем при измерении методом ВСУЗИ [17]. Так, по данным G.S. Mintz с соавт., коронарная ангиография позволяет установить кальций только в 38% случаев и возможность его выявления зависит от степени тяжести кальциноза КА [18].

Внутрисосудистые методы визуализации

Последнее десятилетие визуализирующие методы диагностики активно развиваются, появляются аппараты с более высоким разрешением. Важным аспектом является использование внутрисосудистой визуализации до и после модификации кальциноза КА. Внутрисосудистая визуализация предоставляет дополнительную информацию о размерах сосуда, характере и длине поражения и играет важную роль в определении стратегии лечения, позволяет оценить степень уменьшения массы и толщины кальцинированной бляшки, наличие диссекций и трещин, от которых зависит оптимальное расширение стента.

К основным параметрам оптимальной имплантации стента относятся минимальная площадь поперечного сечения стента (не менее 5,5 мм²), степень расширения стента (остаточный стеноз не более 20%), избегание имплантации края стента в стеноз более 50%, мальпозиция (расстояние стента



Рисунок 1. Выраженный кальциноз передней нисходящей артерии на статичном рентгеноскопическом изображении до введения рентгеноконтрастного вещества

Figure 1. Severe calcification of left anterior descending artery on a static fluoroscopic image before contrast medium administration

до стенки сосуда не более 0,4 мм длиной не более 1 мм) и диссекция (отслойка интимы радиусом не более 60°, длиной не более 2 мм) [20]. Контрольное ВСУЗИ позволяет корректировать данные параметры до достижения целевых.

Внутрисосудистое ультразвуковое исследование

Внутрисосудистое ультразвуковое исследование осуществляется с помощью катетера со встроенным на его кончике ультразвуковым датчиком. Волны генерируются специальным пьезокристаллом во время прохождения через него электрического тока. На границе тканей с разной плотностью УЗ-волны частично отражаются, таким образом часть волн возвращается к датчику, далее сигнал преобразуется в электрический и передается на консоль, где из его амплитудной составляющей формируется изображение. Кальций на ВСУЗИ определяется как гиперэхогенное образование. Поскольку ультразвуковая волна отражается от кальцинированной поверхности, данный метод не позволяет оценить толщину и площадь кальция, но предоставляет количественную характеристику в виде оценки угла кальциноза и длины поражения (рис. 2).

В отношении ЧКВ с использованием стентов с лекарственным покрытием в исследованиях IVUS-XPL [20] и СТО-IVUS продемонстрировано значительное снижение неблагоприятных сердечно-сосудистых событий (MACE) и частоты повторной реваскуляризации при стентировании под контролем ВСУЗИ [21]. X. Wang и соавт. (2017) оценили кальцинированные поражения коронарных артерий (n = 440) с помощью ангиографии, ВСУЗИ и оптической когерентной томографии (ОКТ) и показали, что ВСУЗИ является более чувствительным методом визуализации. Кальциноз КА диагностирован с помощью ангиографии в 40,2% случаев, при ОКТ – в 76,8%, методом ВСУЗИ – в 82,7% [22].

Недостаточное расправление стента является главным предиктором раннего тромбоза и рестеноза стента. Удовлетворительный долгосрочный результат коронарного стентирования достигается при минимальной площади поперечного сечения имплантированного стента (более 5,5 мм²), которая связана с удовлетворительными долгосрочными результата-

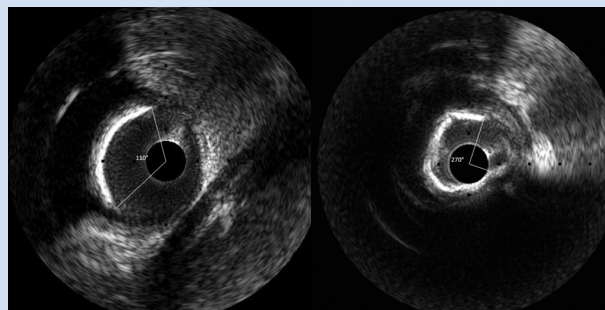


Рисунок 2. Кальциноз коронарной артерии при ВСУЗИ
Figure 2. Coronary artery calcification IVUS-image

ми. Однако эти параметры нельзя экстраполировать на сосуды малого диаметра [11]. Для поражения ствола левой коронарной артерии пороговое значение отличается и составляет 7 мм² в терминальном отделе и 8 мм² в проксимальном отделе ствола.

Оптимальным расширением стента считается отношение минимальной площади поперечного сечения стента к средней площади просвета сосуда более 80%, что также можно трактовать как степень остаточного стеноза менее 20%. Поэтому существенную роль в определении степени остаточного стеноза играют визуализирующие методики, учитывая, что достижение расширения > 90% (остаточный стеноз менее 10%), которое ангиографически определить невозможно, достигается не в каждом случае.

Оптическая когерентная томография

В ОКТ используется инфракрасный свет с длиной волны 1,3 мкм, метод основан на изменении времени задержки отраженного светового сигнала в инфракрасном спектре. Источник света излучает два луча, один из которых поступает на воспринимающий датчик оптического волокна, а другой – в ткани, где происходит его рассеивание, поглощение и отражение. Интенсивность сигнала и задержка отраженного света зависят от плотности тканей, что приводит к построению изображения с четкими границами. Клетки крови в просвете сосуда отражают инфракрасный свет, значительно снижая разрешающую и проникающую способность луча, поэтому с целью улучшения качества изображения во время тракции датчика вводится рентгеноконтрастное вещество.

При ОКТ-визуализации кальциноза КА свет хорошо проникает в кальций, который проявляется зоной просветления с четкой очерченной границей. С помощью ОКТ можно проводить количественную оценку кальцинированных бляшек – дугу кальциноза, длину, толщину, протяженность, площадь и объем, определять наличие микрокальцинатов (таблица). В исследовании ILUMIEN III, посвященном сравнению эффективности ЧКВ с применением ОКТ и ЧКВ под контролем ВСУЗИ, продемонстрирована равнозначная эффективность в достижении оптимального расправления стента, кардиальные события (MACE) в 30-дневный период наблюдения между этими группами также были сопоставимы [23]. Примечательно, что установленное протоколом оптимальное расширение стента было достигнуто только в 41% наблюдений, а разница минимальной площади поперечного сечения стента была минимальной по сравнению с группой ВСУЗИ-контроля.

A. Fujino и коллеги предложили шкалу для оценки кальцинированных бляшек с числовыми пороговыми значениями дуги кальциноза > 180° (2 балла), длины кальциноза > 5 мм (1 балл) и толщины кальция > 0,5 мм (1 балл), все эти показате-

ли связаны с недостаточным расширением стента (расширение стента < 80%) [24].

Подобно шкале оценки кальцинированных бляшек при ОКТ была создана равноценная шкала оценки кальциноза КА по результатам ВСУЗИ, однако из-за проникающих свойств ультразвуковой волны возможно измерение угла кальциноза и его протяженности [25]. При наборе 4 баллов по ОКТ-шкале и 2 баллов по ВСУЗИ-шкале рекомендована модификация кальцинированной бляшки для оптимального расширения стента.

Благодаря высокой разрешающей способности ОКТ позволяет точно выявлять признаки субоптимальной имплантации стента, протрузию бляшки, остаточный стеноз, мальпозицию. Минимальная площадь поперечного сечения стента под контролем ОКТ составляет 4,5 мм². Если при ОКТ определяют признаки мальпозиции стента (< 0,4 мм на протяжении < 1 мм), то постдилатация не требуется – принято считать, что подобные характеристики не препятствуют процессу полной эндотелизации [26].

Несмотря на лучшую проникающую способность, применение ОКТ имеет ограничения, обусловленные необходимостью замещения крови

Шкала оценки кальция по данным ОКТ и ВСУЗИ
Calcium scale based on OCT and IVUS

ОКТ / OCT		
Толщина кальция, мм / Calcium thickness, mm	≤ 0,5	0 баллов / point
	> 0,5	1 балл / point
Угол кальциноза / Calcium angle, °	≤ 90	0 баллов / point
	90–180	1 балл / point
	> 180	2 балла / point
Длина кальция, мм / Calcium length, mm	≤ 5	0 баллов / point
	> 5	1 балл / point
ВСУЗИ / IVUS		
Окружность кальция / Calcium arc, °	< 360	0 баллов / point
	360	1 балл / point
Угол кальциноза / Calcium angle > 270°, °	≤ 5	0 баллов / point
	> 5	1 балл / point
Диаметр, мм / Diameter, mm	> 3,5	0 баллов / point
	≤ 3	1 балл / point
Узлы кальция / Calcified nodule	Отсутствуют / No	0 баллов / point
	Присутствуют / Yes	1 балл / point

Примечание: ОКТ – оптическая когерентная томография; ВСУЗИ – внутрисосудистое ультразвуковое исследование. Адаптировано из: Karimi Galougahi K., Shlofmitz E., Jeremias A., Gogia S., Kirtane A.J., Hill J.M., Karpaliotis D., Mintz G.S., Maehara A., Stone G.W., Shlofmitz R.A., Ali Z.A. Therapeutic approach to calcified coronary lesions: disruptive technologies. Curr. Cardiol. Rep. 2021;23(4):33. doi: 10.1007/s11886-021-01458-7

Note: OCT – optical coherence tomography; IVUS – intravascular ultrasound. Source: Karimi Galougahi K., Shlofmitz E., Jeremias A., Gogia S., Kirtane A.J., Hill J.M., Karpaliotis D., Mintz G.S., Maehara A., Stone G.W., Shlofmitz R.A., Ali Z.A. Therapeutic approach to calcified coronary lesions: disruptive technologies. Curr. Cardiol. Rep. 2021;23(4):33. doi: 10.1007/s11886-021-01458-7

рентгеноконтрастным средством на участке исследования для улучшения его разрешающей способности, что лимитирует использование данного метода у пациентов с нефропатией.

Лечение

Медикаментозная терапия

Медикаментозная терапия кальциноза КА направлена лишь на снижение прогрессирования атеросклеротической бляшки. На сегодняшний день нет общепринятого консервативного лечения кальцинированного поражения коронарных артерий. Нерандомизированные исследования показали регрессирование кальциноза при использовании блокаторов кальциевых каналов, эстрогентерапии. Некоторые авторы утверждают, что статинотерапия не оказывает существенного влияния на кальциноз КА, хотя отмечают короткий срок наблюдения (12 мес.) [27]. Учитывая эффекты статинов, ряд исследователей высказали предположение о том, что динамику кальцификации атеросклеротической бляшки можно использовать при оценке эффективности лечения этой группой препаратов, однако доклинические исследования, напротив, продемонстрировали прокальцифицирующие эффекты статинов [28]. По мнению других авторов, использование высоких доз статинов влияет на стабилизацию атеросклеротической бляшки за счет увеличения плотности фиброзной капсулы и увеличения количества и размеров кальцинатов в бляшке [29]. В то же время известно, что формирование кальциноза КА проходит стадию уязвимости, когда высок риск разрыва и эрозии капсулы из-за роста очагов кальцификации. Тем не менее доказанным является значимый противовоспалительный эффект статинов как в отношении локальных, так и системных реакций [30].

Чрескожное коронарное вмешательство при сложных кальцинированных коронарных поражениях

Постоянное развитие медицинских технологий и совершенствование методов ЧКВ позволяет выполнять интервенции на сложных поражениях коронарных артерий. Но, как известно, кальциноз КА представляет трудности при проведении ЧКВ, что может приводить к недостаточному расширению стента и увеличивает последующий риск рестеноза и тромбоза стента. Алгоритм лечения кальцинированных поражений коронарных артерий согласно современному консенсусу Американского общества сердечно-сосудистой ангиографии и интервенции (SCAI) 2024 года включает детальную оценку кальциевой дуги, длины и толщины кальция с применением методов внутрисосудистой визуализации [31]. При наличии кальциевой дуги 360° или 270° с длиной кальцинированного сегмента $\geq 5,0$ мм рекомендовано применение методик модификации кальцинированного поражения, включающих ангиопластику

баллонами высокого давления или режущими баллонами, ротационную, орбитальную, лазерную, эксимерную атерэктомию или их сочетание. Важным этапом после модификации атеросклеротической бляшки является повторное проведение внутрисосудистой визуализации с целью оценки эффективности надломов кальциевых сегментов. При неоптимальной модификации кальциевой дуги данная процедура должна быть проведена повторно.

Баллоны высокого давления

Баллоны высокого давления, в отличие от традиционных, выдерживают большее давление, обеспечивая равномерное расширение баллона и его локальное действие в кальцинированном сегменте сосуда, что позволяет избежать образования «тали» [32]. Данные баллоны используют в качестве баллона первого выбора при легких и умеренных кальцинированных поражениях, когда угол кальциноза $< 90^\circ$. В основе баллонной ангиопластики лежит формирование диссекции, раздавливание и перераспределение субстрата бляшки в сосуде (рис. 3). В баллонах ультравысокого давления применяют двухслойную технологию, обеспечивающую сверхвысокое давление внутри баллона с минимальным увеличением его диаметра. Этот баллон можно использовать при номинальном давлении 1 010 кПа и давлении разрыва 3 546 кПа. Однако применение данной методики связано с высокой частотой неконтролируемых диссекций, которые могут распространиться и на интактную часть сосуда.

Режущий баллон

В качестве альтернативного метода подготовки кальцинированного поражения перед имплантацией стента может быть использована баллонная ангиопластика режущим баллоном. Режущий баллонный катетер имеет три или четыре металлических лезвия, расположенных продольно на внешней поверхности баллона, которые формируют надрезы в месте воздействия во время дилатации. Разработанный в 1991 г. баллон Flextome (Boston Scientific, США) представлял собой устройство с лезвиями на монорельсовой доставке, а самая последняя версия, Wolverine (Boston Scientific, США), отличается меньшим профилем и гибкостью (рис. 4). Металлические лезвия размещены продольно на поверхности баллона, что дополнительно предотвращает его смещение и позволяет производить радиальные надрезы во время дилатации.

Результаты первоначальных исследований баллонной ангиопластики режущим баллоном казались весьма многообещающими за счет достижения большего увеличения просвета по сравнению со стандартной баллонной ангиопластикой, но демонстрировали высокую частоту осложнений в виде диссекций и перфораций. X. Zhu и соавт. (2021) сравнили воздействие режущего баллона с двумя

видами позиционирования лезвий относительно пораженного участка артерий с углом кальциноза 180° . В первом случае к кальцинированному сегменту обращены два лезвия, во втором – одно лезвие. Исследование демонстрирует преимущество дилатации баллона первым способом (см. рис. 3), при котором на кальцинированный сегмент производится воздействие двумя лезвиями, что создает большее напряжение на кальцинированный сегмент, вызывает ее рассечения (трещины) и снижает давление на интактную часть сосуда, уменьшая ее травмирование [33]. Несмотря на высокую эффективность данной методики, проведение режущего баллона в неподготовленный кальцинированный сегмент не всегда возможно и его использование в сосудах с выраженным кальцинозом ограничено.

Другая разновидность режущих баллонов представляет собой баллон с проводниками, которые проходят по его поверхности и при дилатации оказывают дополнительное механическое воздействие на бляшку. Эти дополнительные элементы позволяют достигать оптимальной дилатации и уменьшают смещение баллона. Баллоны имеют те же показания к применению, что и режущие баллоны с лезвиями, но оснащены меньшим профилем, более гибкие и могут достигать полного расширения при низком давлении, следовательно, меньше травмируют стенку сосудов с меньшим риском диссекции коронарных артерий [34]. Данный тип баллонов рассматривался в качестве альтернативы режущим баллонам, и в последние годы им отдавалось предпочтение из-за гибкости, хотя в литературе не представлены данные крупных исследований.

Ротационная атерэктомия

Ротационную атерэктомию уже более 30 лет широко используют при лечении выраженного кальциноза КА. Результаты первых исследований, в которых сравнивались данные ротационной атерэктомии и стандартной ангиопластики, показали высокую частоту рестенозов через 6 мес. наблюдения в группе атерэктомии [35]. В эпоху стентов с лекарственным покрытием частота рестенозов заметно уменьшилась, тогда же ротационная атерэк-

томия была отнесена к методам подготовки поражения перед имплантацией стента в случаях выраженного кальциноза КА. Модификация поражения с помощью данного метода значительно облегчила проведение стентов, что предотвращало повреждение полимера при их доставке. Ротационный бур при вращении целенаправленно срезает кальцинированный слой, «полируя» поверхность и превращая кальций в микрочастицы (5–10 мкм) (рис. 4).

Система ротационной атерэктомии Rotablator (Boston Scientific, США) представляет собой катетерное устройство с никелированным эллиптическим буром с алмазным напылением на кончике, диаметр которого варьирует от 1,25 до 2,50 мм. Уменьшение размера бура, определение и внедрение стандартизированных протоколов с использованием низких скоростей вращения позволили снизить частоту перипроцедурных осложнений [36]. Допускается трансрадиальный доступ при использовании бура диаметром 1,25, 1,50 или 1,75 мм. Специальный проводник 0,010" (RotaWire) длиной 330 мм используется для прохождения кальцинированного поражения. Когда бур расположен проксимальнее поражения, ротабляцию следует начинать с коротких циклов (< 20 секунд) при низкой скорости вращения (135 000–180 000 об./мин). Согласно консенсусу европейских экспертов, оптимальное соотношение бур/артерия – 0,6, тогда как в документе консенсуса экспертов Северной Америки и Японии рекомендовано соотношение бур/артерия 0,4–0,6 [37, 38].

В качестве начального доступа бура малого диаметра (1,25 и 1,50 мм) достаточно для большинства поражений, но иногда при этапном подходе требуется увеличение диаметра. Необходим контроль рентгеноскопических, звуковых и тактильных сигналов, чтобы избежать замедления скорости вращения бура (> 5 000 об./мин), которое может привести к осложнениям. Возможными осложнениями ротационной атерэктомии являются синдром no- или slow-reflow, который нивелируется с помощью внутрикоронарного введения вазодилататоров, заклинивание бура, перфорация и транзиторная атриовентрикулярная блокада. Профилактическая установка временного

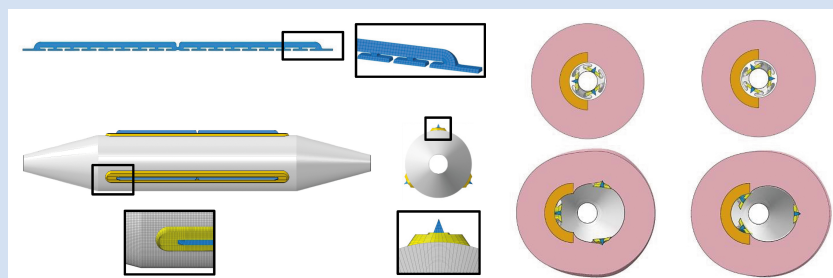


Рисунок 3. Режущий баллон. Воздействие лезвий баллона на кальций сосудистой стенки [32]

Figure 3. Cutting balloon. The impact of balloon blades on the calcium of the vascular wall [32]

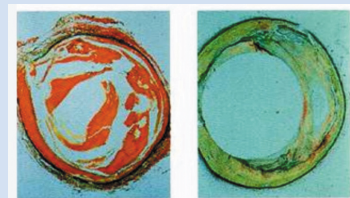


Рисунок 4. Срез сосуда после воздействия на поражение баллонной ангиопластикой (слева) и ротационной атерэктомией (справа)

Figure 4. Section of the vessel after exposure to the lesion with balloon angioplasty (left) and rotational atherectomy (right)

электрокардиостимулятора показана при протяженных поражениях правой коронарной артерии. Ротационная атерэктомия противопоказана при стенозе аортокоронарного венозного шунта, расслоении и тромбозе, хотя данные регистра из 1 308 пациентов с острым коронарным синдромом указывают на возможность проведения ротационной атерэктомии и в этой клинической ситуации [38].

Первые исследования, посвященные ротационной атерэктомии, опубликованы в 1987 г. [39], с тех пор процедурный успех существенно не изменился: примерно 89–95% в ранних исследованиях (1990 г.) [40] и 92% в исследовании ROTAXUS (2013 г.) [41]. В исследовании ROTAXUS рутинное применение ротационной атерэктомии с последующей имплантацией стента с лекарственным покрытием было связано с большей степенью расширения стента по сравнению с подготовкой поражения с помощью баллонной ангиопластики, однако частота рестеноза оставалась одинаково высокой в обеих группах через 9 мес. (11,7 и 12,5% соответственно, $p < 0,01$) [42].

Обнадешивающие результаты получены в рандомизированном исследовании PREPARE-CALC (2018 г.), которое включает изучение результатов лечения 200 пациентов. Рандомизация выполнена на основании применения ротационной атерэктомии или баллонной ангиопластики в качестве метода модификации кальцинированного участка поражения коронарных артерий перед имплантацией стента [43]. Первичная конечная точка (поздняя потеря просвета) чаще достигнута при ротационной атерэктомии, чем при использовании режущего баллона (98 против 81% соответственно), в первую очередь из-за трудной доставки баллонов с широким профилем, но без существенной разницы показателя поздней потери просвета через 9 мес. Стоит отметить, что внутрисосудистая визуализация не использовалась в качестве инструмента, определяющего выбор методики модификации кальциноза КА.

В 2018 г. K. Amemiya и коллеги провели проспективное одноцентровое нерандомизированное исследование по сопоставлению результатов баллонной ангиопластики режущим и стандартным баллонами после ротационной атерэктомии кальцинированного поражения коронарных артерий, а результаты оценили с помощью ОКТ. Исследование продемонстрировало преимущества использования режущего перед стандартным баллоном при достижении оптимальной степени расширения стента (78,9 против 66,7% соответственно, $p < 0,01$) [44]. Однако данная работа имеет ограничения: исследование нерандомизированное, с участием небольшого количества пациентов, а методика модификации кальцинированной бляшки была определена по усмотрению одного оператора. Исследование включало только успешные ЧКВ, режущий баллон

был применен исключительно в крупных сосудах, чем и объясняется получение оптимальной минимальной площади поперечного сечения стента.

При сопоставлении результатов вышеперечисленных методик и постоянного совершенствования технических характеристик современного инструментария встает вопрос, позволит ли сочетание методик ротационной атерэктомии и режущего баллона под контролем визуализации оптимально модифицировать кальцинированное поражение перед имплантацией стента и, соответственно, повлиять на процедурный успех, отдаленные результаты.

Орбитальная атерэктомия

Орбитальная атерэктомия, подобно ротационной, воздействует на кальцинированное поражение, разрушая кальций до частиц размером < 2 мкм, которые минимально влияют на микроциркуляторное русло.

В настоящее время коммерчески доступное устройство для орбитальной атерэктомии – Dimondblack 360 (Cardiovascular System, США), не зарегистрированное на территории Российской Федерации. Это катетерное устройство с двунаправленной коронкой и алмазным напылением, в единственном размере 1,25 мм, которое применяется для сосудов диаметром 2,5–4,0 мм. За счет центробежной силы диаметр движения коронки увеличивается, захватывая кальцинированное поражение. Две скорости вращения, а именно 60 000 (низкая скорость) и 120 000 (высокая скорость) об./мин, позволяют выполнять атерэктомию в сосудах разного диаметра – например, за счет высокой скорости создается большая центробежная сила и происходит больший охват поражения в крупном сосуде. Устройство позволяет операторам контролировать глубину атерэктомии путем увеличения скорости вращения (от 60 000 до 120 000 об./мин).

ORBIT I является первым исследованием, в котором оценены безопасность и эффективность орбитальной атерэктомии. Так, при анализе результатов лечения 50 пациентов с кальцинозом КА в двух индийских центрах частота неблагоприятных сердечно-сосудистых событий (MACE) составила 6% в течение 30 дней наблюдения и 8% через 6 мес. [45]. В последующем были представлены результаты исследования ORBIT II, продемонстрировавшие безопасность и эффективность орбитальной атерэктомии у пациентов с кальцинозом КА в сроки наблюдения 12 мес.: частота MACE составила уже 16,9%, включая инфаркт миокарда в 10,6% наблюдений и кардиальную смерть 3,2% пациентов [46].

В исследовании ECLIPSE оценены результаты орбитальной атерэктомии и традиционной баллонной ангиопластики при кальцинозе КА перед имплантацией стентов с лекарственным покрытием. Это крупное, продолжающееся на данный мо-

мент исследование, в котором участвуют около 2 тыс. пациентов.

Эксимерная лазерная коронарная атерэктомия

В основе эксимерной лазерной атерэктомии лежит механизм фотохимической и фототермической абляции, приводящий к модификации кальцинированной бляшки. В системе CVX 30 (Philips, США) используется хлорид ксенона для получения света в ультрафиолетовом спектре В (308 нм) с проникновения на 30–50 мкм для ограничения повреждения меди и адвентиции. Высвобожденные микрочастицы (< 10 мкм) оказывают незначительное влияние на микроциркуляцию [47]. Лазерная система совместима с направляющими катетерами 6, 7 и 8 Fr, проводником 0,014". Первоначальный опыт лечения кальцинированных поражений коронарных артерий показал 93% успешности данной процедуры [50]. Также была описана комбинация эксимерного лазера и ротационной атерэктомии (RASER) [48]. Эта техника использовалась при лечении выраженного in-stent рестеноза с положительным результатом [48].

Внутрисосудистая коронарная литотрипсия

Внутрисосудистая литотрипсия – метод лечения кальцинированных поражений коронарных артерий. Коронарная литотрипсия основана на принципах стандартной технологии литотрипсии, которая используется для лечения мочекаменной болезни. Механическая энергия применяется для селективной фрагментации кальция и не затрагивает мягкие ткани.

Система литотрипсии Shockwave Medical (США) состоит из трех компонентов: генератора на батарейках, производящего энергию 3кВ, запрограммированного на подачу фиксированного количества импульсов на баллон, кабеля, который соединяет генератор с катетером, и баллонного катетера с тремя излучателями, распределенными по длине баллона. Эти излучатели преобразуют электрическую энергию в короткие импульсы (1 импульс/с, максимум 80 импульсов). Баллоны для литотрипсии выпускаются в размерах от 2,5 до 4,0 мм с максимальной длиной 12 мм. После дилатации баллона до 4 атм (405 кПа) пульсирующая энергия излучается в течение 10 секунд двумя излучателями, расположенными внутри баллона (дистальный излучатель расположен ближе к центру для повышения гибкости), затем баллон дилатируют до 6 атм (608 кПа). Эти баллоны совместимы с направляющими катетерами 5 и 6 Fr. В некоторых случаях перед дилатацией баллона для литотрипсии необходима преддилатация стандартным баллоном диаметром 1,5 или 2,0 мм.

D.J. Kereiakes и соавт. провели анализ четырех проспективных исследований (Disrupt CAD I, II,

III, IV) с участием 628 пациентов из 12 стран, продемонстрировавший безопасность и эффективность применения внутрисосудистой литотрипсии при подготовке кальцинированных поражений перед стентированием. Частота 30-дневных MACE составила 7,3% (Q-негативный инфаркт миокарда без клинических проявлений), оптимальная подготовка поражения была достигнута у 92,4% пациентов [50]. Необходимость повторного вмешательства на целевом сосуде и кардиальная смерть через 30 дней зарегистрированы в 7,2 и 0,5% случаев соответственно. Осложнения в виде диссекции артерии наблюдались у 2,1% пациентов, синдром no-reflow – у 0,4%, перфорация и окклюзия сосуда не возникали. Хотя эти результаты и многообещающие, в исследование не вошли больные с поражением ствола левой коронарной артерии, устьевыми поражениями, поражениями с выраженной извитостью.

Аортокоронарное шунтирование

Тяжесть атеросклеротического поражения коронарных артерий оценивается с помощью шкалы SYNTAX, одним из параметров, который увеличивает суммарный балл, является наличие кальциноза КА. У ряда пациентов с трехсосудистым поражением и поражением ствола левой коронарной артерии при определении значения по шкале SYNTAX более 22 предпочтительным методом реваскуляризации является аортокоронарное шунтирование. Полученные результаты сопоставимы при любой морфологии стенотического поражения, однако прогностическое значение кальциноза КА у пациентов при аортокоронарном шунтировании недостаточно изучено. Взаимосвязь наличия кальциноза КА и клинических исходов у перенесших аортокоронарное шунтирование лиц проанализирована только в одном исследовании с участием 755 пациентов, госпитализированных с острым коронарным синдромом [51]. В этом наблюдении наличие кальциноза было связано с худшим прогнозом в течение года наблюдения, включая MACE, смерть или инфаркт миокарда. У пациентов с выраженным кальцинозом КА в течение первого месяца после вмешательства в 1,5 раза чаще, чем у больных без кальциноза, развивался инфаркт миокарда. Несколько причин объясняют эти заключения. Во-первых, отложения кальция снижают эластичность сосудов, что приводит к увеличению пульсового давления, снижению коронарной перфузии и эндотелиальной дисфункции. Несмотря на технически удовлетворительно проведенное вмешательство, эндотелиальная дисфункция и дистальная эмболия могут привести к увеличению частоты ишемических событий. Во-вторых, выраженный кальциноз связан с трудностями выполнения сосудистых анастомозов, среди которых увеличение продолжительности процедуры и искусственного кровообращения.

В-третьих, кальциноз коронарных артерий ограничивает возможность достижения полной реваскуляризации, что само по себе связано с ухудшением долгосрочных результатов.

Заключение

За последние годы были достигнуты значительные успехи в диагностике и лечении кальцинированных поражений КА, однако до сих пор нет идеального метода лечения. Исходя из представленных выше данных можно утверждать, что адекватная модификация кальцинированного поражения имеет решающее значение для оптимального распрвления стента, а совместное использование визуализирующих методик позволит улучшить результаты лечения кальциноза КА. На фоне известных классификаций и шкал кальциноза КА в сочетании с визуализирующими методами диагностики

существуют алгоритмы выбора лечения, однако их модификация и комбинирование, вероятно, приведет к лучшим процедурному успеху и отдаленным результатам.

Конфликт интересов

А.Ю. Цыденова заявляет об отсутствии конфликта интересов. А.А. Баранов заявляет об отсутствии конфликта интересов. Р.А. Найденов заявляет об отсутствии конфликта интересов. Р.У. Ибрагимов заявляет об отсутствии конфликта интересов. Д.С. Гранкин заявляет об отсутствии конфликта интересов. О.В. Крестьянинов заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии финансирования статьи.

Информация об авторах

Цыденова Арюна Юрьевна, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0003-4010-7518

Баранов Алексей Алексеевич, ординатор федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-2320-2233

Найден Роман Александрович, кандидат медицинских наук заведующий отделением рентгенохирургических методов диагностики и лечения федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-1384-7185

Ибрагимов Руслан Увэйсович, кандидат медицинских наук врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-3866-123X

Гранкин Денис Сергеевич, кандидат медицинских наук врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0002-0083-8888

Крестьянинов Олег Викторович, доктор медицинских наук руководитель центра эндоваскулярной хирургии, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Новосибирск, Российская Федерация; **ORCID** 0000-0001-5214-8996

Author Information Form

Tsydenova Aryuna Yu., Doctor of X-Ray Endovascular Diagnostics and Treatment at the Endovascular Surgery Center, Federal State Budgetary Institution "Meshalkin National Medical Research Center" of the Ministry of Health of Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0003-4010-7518

Baranov Aleksey A., Resident at the Federal State Budgetary Institution "Meshalkin National Medical Research Center" of the Ministry of Health of Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-2320-2233

Naydenov Roman A., PhD, Head of the Department of X-ray Surgical Diagnostics and treatment, Federal State Budgetary Institution "Meshalkin National Medical Research Center" of the Ministry of Health of Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-1384-7185

Ibragimov Ruslan U., PhD., Doctor of X-Ray Endovascular Diagnostics and Treatment at the Endovascular Surgery Center, Federal State Budgetary Institution "Meshalkin National Medical Research Center" of the Ministry of Health of Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-3866-123X

Grankin Denis S., PhD., Doctor of X-Ray Endovascular Diagnostics and Treatment at the Endovascular Surgery Center, Federal State Budgetary Institution "Meshalkin National Medical Research Center" of the Ministry of Health of Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0002-0083-8888

Krestyaninov Oleg V., PhD, Head of the Department of Endovascular Surgery, Federal State Budgetary Institution "Meshalkin National Medical Research Center" of the Ministry of Health of Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation; **ORCID** 0000-0001-5214-8996

Вклад авторов в статью

ЦАЮ – вклад в концепцию исследования, написание и корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

БАА – вклад в концепцию исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

НРА – вклад в концепцию исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

ИРУ – вклад в концепцию исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

ГДС – вклад в концепцию исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

КОВ – вклад в концепцию исследования, корректировка статьи, утверждение окончательной версии для публикации, полная ответственность за содержание

Author Contribution Statement

TsAYu – contribution to the concept of the study, manuscript writing, editing, approval of the final version, fully responsible for the content

BAA – contribution to the concept of the study, manuscript editing, approval of the final version, fully responsible for the content

NRA – contribution to the concept of the study, manuscript editing, approval of the final version, fully responsible for the content

IRU – contribution to the concept of the study, manuscript editing, approval of the final version, fully responsible for the content

GDS – contribution to the concept of the study, manuscript editing, approval of the final version, fully responsible for the content

KOV – contribution to the concept of the study, manuscript editing, approval of the final version, fully responsible for the content

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Genereux P., Madhavan M.V., Mintz G.S., Maehara A., Palmerini T., Lasalle L., Xu K., McAndrew T., Kirtane A., Lansky A.J., Brener S.J., Mehran R., Stone G.W. Ischemic outcomes after coronary intervention of calcified vessels in acute coronary syndromes: pooled analysis from the HORIZONS-AMI (harmonizing outcomes with revascularization and stents in acute myocardial infarction) and ACUTY (acute catheterization and urgent intervention triage strategy) trials. *J Am Coll Cardiol.* 2014;63:1845–1854. doi: 10.1016/j.jacc.2014.01.034.
2. Kastrati A., Schömig A., Elezi S., Schühlen H., Dirschinger J., Hadamitzky M., Wehinger A., Hausleiter J., Walter H., Neumann F.J. Predictive factors of restenosis after coronary stent placement. *J Am Coll Cardiol.* 1997;30:1428–36 as diabetes. doi: 10.1016/s0735-1097(97)00334-3
3. Huisman J., van der Heijden L.C., Kok M.M., Louwerenburg J.H., Danse P.W., Jessurun G.A., de Man F.H., Löwik M.M., Linssen G.C., IJzerman M.J., Doggen C.J., von Birgelen C. Two-year outcome after treatment of severely calcified lesions with newer-generation drug-eluting stents in acute coronary syndromes: a patient-level pooled analysis from TWENTE and DUTCH PEERS. *J Cardiol* 2017;69:660–5. doi: 10.1016/j.jjcc.2016.06.010.
4. Copeland-Halperin R.S., Baber U., Aquino M., Rajamanickam A., Roy S., Hasan C., Barman N., Kovacic J.C., Moreno P., Krishnan P., Sweeny J.M., Mehran R., Dangas G., Kini A.S., Sharma S.K. Prevalence, correlates, and impact of coronary calcification on adverse events following PCI with newer-generation DES: findings from a large multiethnic registry. *Catheter Cardiovasc Interv* 2018;91:859–66. doi: 10.1002/ccd.27204
5. Wang F., Rozanski A., Dey D., Arnson Y., Gransar H., Friedman J., Hayes S.W., Thomson L.E.J., Tamarappoo B., Shaw L.J., Min J.K., Rumberger J.A., Budoff M.J., Miedema M.D., Blaha M.J., Berman D.S. Age- and gender-adjusted percentiles for number of calcified plaques in coronary artery calcium scanning. *J Cardiovasc Comput Tomogr.* 2018.S1934-5925(18)30308-3. doi: 10.1016/j.jcct.2018.12.001.
6. Shaw L.J., Narula J., Chandrasekhar Y. The never-ending story on coronary calcium: is it predictive, punitive, or protective? *J Am Coll Cardiol* 2015;65:1283-1285. doi: 10.1016/j.jacc.2015.02.024
7. Nakahara T., Dweck M.R., Narula N., Pisapia D., Narula J., Strauss H.W. Coronary artery calcification: from mechanism to molecular imaging. *JACC Cardiovasc Imaging* 2017;10:582–9. doi: 10.1016/j.jcmg.2017.03.005
8. Dhore C.R., Cleutjens J.P., Lutgens E., Cleutjens K.B., Geusens P.P., Kitslaar P.J., Tordoir J.H., Spronk H.M., Vermeer C., Daemen M.J. Differential expression of bone matrix regulatory proteins in human atherosclerotic plaques. *Arterioscler Thromb Vasc Biol.* 2001;21(12):1998-2003. doi:10.1161/hq1201.100229
9. G  n  reux P., Redfors B., Witzensbichler B., Arsenault M.P., Weisz G., Stuckey T.D., Rinaldi M.J., Neumann F.J., Christopher Metzger D., Henry T.D., Cox D.A., Duffy P.L., Mazzaferri E.L. Jr., Francese D.P., Marquis-Gravel G., Mintz G.S., Kirtane A.J., Maehara A., Mehran R., Stone G.W. Two-year outcomes after percutaneous coronary intervention of calcified lesions with drug-eluting stents. *Int J Cardiol* 2017;231:61–7. doi: 10.1016/j.ijcard.2016.12.150.
10. Sharma S.K., Tomey M.I., Teirstein P.S., Kini A.S., Reitman A.B., Lee A.C., G  n  reux P., Chambers J.W., Grines C.L., Himmelstein S.I., Thompson C.A., Meredith I.T., Bhawe A., Moses J.W. North American expert review of rotational atherectomy. *Circ Cardiovasc Interv.* 2019; 12:e007448. doi: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.118.007448
11. Kang S.-J. Intravascular ultrasound-derived criteria for optimal stent expansion and preprocedural prediction of stent underexpansion. *Circ Cardiovasc Interv.* 2021; 14: e011374. doi: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.121.011374.
12. Mintz G.S., Guagliumi G. Intravascular imaging in coronary artery disease. *Lancet* 2017;390:793–809. doi: 10.1016/S0140-6736(17)31957-8
13. Busse A., Cantr   D., Beller E., Streckenbach F.,   ner A., Ince H., Weber M.A., Meinel F.G. Cardiac CT: why, when, and how: update 2019. *Radiologe.* 2019; 59 (Suppl 1):1-9. doi: 10.1007/s00117-019-0530-9
14. Faggiano P., Dasseni N., Gaibazzi N., Rossi A., Henein M., Pressman G. Cardiac calcification as a marker of subclinical atherosclerosis and predictor of cardiovascular events: a review of the evidence. *Eur J Prev Cardiol* 2019;26:1191–204. doi: 10.1177/2047487319830485
15. Polak J. F., Tracy R., Harrington A., Zavodni A. E. H., O'Leary D. H. Carotid artery plaque and progression of coronary artery calcium: The multi-ethnic study of atherosclerosis. *J Am Soc Echocardiogr.* 2013;26(5):548-55. doi: 10.1016/j.echo.2013.02.009.
16. Tuzcu E.M., Berkalp B., De Franco A.C., Ellis S.G., Goormastic M., Whitlow P.L., Franco I., Raymond R.E., Nissen S.E. The dilemma of diagnosing coronary calcification:

angiography versus intravascular ultrasound. *J Am Coll Cardiol*. 1996;27:832-838. doi: 10.1016/0735-1097(95)00537-4

17. Kubo T., Akasaka T., Shite J., Suzuki T., Uemura S., Yu B., Kozuma K., Kitabata H., Shinke T., Habara M., Saito Y., Hou J., Suzuki N., Zhang S. OCT compared with IVUS in a coronary lesion assessment: the OPUS-CLASS study. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2013;6(10):1095-1104. doi: 10.1016/j.jcmg.2013.04.014.

18. Mintz G.S., Popma J.J., Pichard A.D., Kent K.M., Satler L.F., Chuang Y.C., Ditrano C.J., Leon M.B. Patterns of calcification in coronary artery disease. A statistical analysis of intravascular ultrasound and coronary angiography in 1155 lesions. *Circulation* 1995;91:1959-1965. doi: 10.1161/01.cir.91.7.1959

19. Räber L., Mintz G.S., Koskinas K.C., Johnson T.W., Holm N.R., Onuma Y., Radu M.D., Joner M., Yu B., Jia H., Meneveau N., de la Torre Hernandez J.M., Escaned J., Hill J., Prati F., Colombo A., di Mario C., Regar E., Capodanno D., Wijns W., Byrne R.A., Guagliumi G.; ESC Scientific Document Group. Clinical use of intracoronary imaging. Part 1: guidance and optimization of coronary interventions. An expert consensus document of the European Association of Percutaneous Cardiovascular Interventions. *Eur Heart J*. 2018;39(35):3281-3300. doi:10.1093/eurheartj/ehy285

20. Hong S.-J., Kim B.-K., Shin D.-H., Nam C.-M., Kim J.-S., Ko Y.-G., Choi D., Kang T.-S., Kang W.-C., Her A.-Y., Kim Y.H., Kim Y., Hur S.-H., Hong B.-K., Kwon H., Jang Y., Hong M.-K. Effect of intravascular ultrasound-guided vs angiography-guided everolimus-eluting stent implantation: the IVUS-XPL Randomized Clinical Trial. *JAMA* 2015;314:2155-2163. doi:10.1001/jama.2015.15454

21. Kim B.-K., Shin D.-H., Hong M.-K., Park H.S., Rha S.-W., Mintz G.S., Kim J.-S., Kim J.S., Lee S.-J., Kim H.-Y., Hong B.-K., Kang W.-C., Choi J.-H., Jang Y. Clinical impact of intravascular ultrasound-guided chronic total occlusion intervention with zotarolimus-eluting versus biolimus-eluting stent implantation: randomized study. *Circ Cardiovasc Interv* 2015;8:e002592. doi: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.115.002592

22. Wang X., Matsumura M., Mintz G.S., Lee T., Zhang W., Cao Y., Fujino A., Lin Y., Usui E., Kanaji Y., Murai T., Yonetsu T., Kakuta T., Maehara A. In vivo calcium detection by comparing optical coherence tomography, intravascular ultrasound, and angiography. *Am J Coll Cardiol Imaging* 2017;10:869-79. doi: 10.1016/j.jcmg.2017.05.014

23. Ali Z.A., Maehara A., G  n  reux P., Shlofmitz R.A., Fabbiochi F., Nazif T.M., Guagliumi G., Meraj P.M., Alfonso F., Samady H., Akasaka T., Carlson E.B., Leeser M.A., Matsumura M., Ozan M.O., Mintz G.S., Ben-Yehuda O., Stone G.W. Optical coherence tomography compared with intravascular ultrasound and with angiography to guide coronary stent implantation (ILUMIEN III: oPTIMIZE PCI): a randomised controlled trial. *Lancet* 2016;388:2618-2628. doi: 10.1093/eurheartj/ehx351

24. Fujino A., Mintz G.S., Matsumura M., Lee T., Kim S.Y., Hoshino M., Usui E., Yonetsu T., Haag E.S., Shlofmitz R.A., Kakuta T., Maehara A. A new optical coherence tomography-based calcium scoring system to predict stent underexpansion. *EuroIntervention* 2018;13:e2182-9. doi: 10.4244/EIJ-D-17-00962

25. Zhang M., Matsumura M., Usui E., Noguchi M., Fujimura T., Fall K., et al. IVUS predictors of stent expansion in severely calcified lesions. *J Am Coll Cardiol*. 2019;74(suppl.13):B51 doi:10.1016/j.jacc.2019.08.083

26. Sotomi Y., Onuma Y., Dijkstra J., Miyazaki Y., Kozuma K., Tanabe K., Popma J.J., de Winter R.J., Serruys P.W., Kimura T. Fate of post-procedural malapposition of everolimus-eluting polymeric bioresorbable scaffold and everolimus-eluting cobalt chromium metallic stent in human coronary arteries: sequential assessment with optical coherence tomography in ABSORB Japan trial *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2018;19:59-66. doi: 10.1093/ehjci/jew329

27. Schmermund A., Achenbach S., Budde T., Buziashvili Y., F  rster A., Friedrich G., Henein M., Kerkhoff G., Knollmann F., Kukharchuk V., Lahiri A., Leischik R., Moshage W., Scharlt M., Siffert W., Steinhagen-Thiessen E., Sinitsyn V., Vogt A., Wiedeking B., Erbel R. Effect of intensive versus standard lipid-lowering treatment with atorvastatin on the progression of calcified coronary atherosclerosis over 12 months: a multicenter, randomized, double blind trial. *Circulation*. 2006;113:427-43. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.105.568147

28. McEvoy J.W., Blaha M.J., DeFilippis A.P., Lima J.A., Bluemke D.A., Hundley W.G., Min J.K., Shaw L.J., Lloyd-Jones D.M., Barr R.G., Budoff M.J., Blumenthal R.S., Nasir K. Cigarette smoking and cardiovascular events: role of inflammation and subclinical atherosclerosis from the MultiEthnic Study of Atherosclerosis. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*. 2015;35(3):700-9 doi: 10.1161/ATVBAHA.114.304562

29. An T., Hao J., Sun S., Li R., Yang M., Cheng G., Zou M. Efficacy of statins for osteoporosis: a systematic review and meta-analysis. *Osteoporos Int*. 2017;28(1):47-57. doi: 10.1007/s00198-016-3844-8

30. Кашпалап В.В., Хрячкова О.Н., Барбараш О.Л. «Новый» патологический континуум: гипогонадизм, остеопороз и кальцинирующий атеросклероз. Общие факторы формирования и прогрессирования. *Атеросклероз*. 2016; 12 (4): 68-78

31. Riley RF, Patel MP, Abbott JD, et al. SCAI expert consensus statement on the management of calcified coronary lesions. *J Soc Cardiovasc Angiogr Interv*. 2024; 3(2):101259. doi:10.1016/j.jscv.2023.101259

32. Costopoulos C., Naganuma T., Colombo A. Tools and techniques clinical: percutaneous intervention of calcific coronary lesions. *EuroIntervention* 2014;9:1124-6. doi: 10.4244/EIJV9I9A188.

33. Zhu X., Umezumi M., Iwasaki K. Finite element analysis of cutting balloon expansion in a calcified artery model of circular angle 180  : Effects of balloon-to-diameter ratio and number of blades facing calcification on potential calcification fracturing and perforation reduction. *PLoS ONE*. 2021; 16(5): e0251404. doi: 10.1371/journal.pone.0251404

34. Jujo K., Saito K., Ishida I., Kim A., Suzuki Y., Furuki Y., Ouchi T., Ishii Y., Sekiguchi H., Yamaguchi J., Ogawa H., Hagiwara N. Intimal disruption affects drug-eluting cobalt-chromium stent expansion: a randomized trial comparing scoring and conventional balloon predilation. *Int J Cardiol* 2016;221:23-31. doi: 10.1016/j.ijcard.2016.07.002

35. Reifart N., Vandormael N., Krajcar M., G  hring S., Preusler W., Schwarz F., St  rger H., Hofmann M., Kl  pper J., M  ller S., Haase J. Randomized comparison of angioplasty of complex coronary lesions at a single center. Excimer Laser, Rotational Atherectomy, and Balloon Angioplasty Comparison (ERBAC) Study. *Circulation* 1997;96:91-8. doi: 10.1161/01.cir.96.1.91

36. Barbato E., Carrie D., Dardas P., Fajadet J., Gaul G., Haude M., Khashaba A., Koch K., Meyer-Gessner M., Palazuelos J., Reczuch K., Ribichini F.L., Sharma S., Sipotz J., Sjogren I., Suetsch G., Szabo G., Valdes-Chavarri M., Vaquerizo B., Wijns W., Windecker S., de Belder A., Valgimigli M., Byrne R.A., Colombo A., Di Mario C., Latib A., Hamm C. European expert consensus on rotational atherectomy. *EuroIntervention*. 2015;11(1):30-6. doi: 10.4244/EIJV11I1A6.

37. Sakakura K., Ito Y., Shibata Y., Okamura A., Kashima Y., Nakamura S., Hamazaki Y., Ako J., Yokoi H., Kobayashi Y., Ikari Y. Clinical expert consensus document on rotational atherectomy from the Japanese association of cardiovascular intervention and therapeutics. *Cardiovasc Interv and Ther* 36, 1-18 (2021). doi: 10.1007/s12928-020-00715-w

38. Iannaccone M., Piazza F., Boccuzzi G.G., D'Ascenzo F., Latib A., Pennacchi M., Rossi M.L., Ugo F., Meliga E., Kawamoto H., Moretti C., Ielasi A., Garbo R., Frangieh A.H., Hildick-Smith D., Templin C., Colombo A., Sardella G. ROTational ATHERectomy in acute coronary syndrome: early and

midterm outcomes from a multicentre registry. *EuroIntervention* 2016;12:1457–64. doi: 10.4244/EIJ-D-15-00485

39. Ritchie J.L., Hansen D.D., Intlekofer M.J., Hall M., Auth D.C. Rotational approaches to atherectomy and thrombectomy. *Z Kardiol* 1987;76(Suppl 6):59-65

40. Ellis S.G., Popma J.J., Buchbinder M., Franco I., Leon M.B., Kent K.M., Pichard A.D., Satler L.F., Topol E.J., Whitlow P.L. Relation of clinical presentation, stenosis morphology, and operator technique to the procedural results of rotational atherectomy and rotational atherectomy-facilitated angioplasty. *Circulation* 1994;89:882-892. doi: 10.1161/01.cir.89.2.882

41. Abdel-Wahab M., Richardt G., Joachim Buttner H., Toelg R., Geist V., Meinertz T., Schofer J., King L., Neumann F.J., Khattab A.A. High-speed rotational atherectomy before paclitaxel-eluting stent implantation in complex calcified coronary lesions: the randomized ROTAXUS (Rotational Atherectomy Prior to Taxus Stent Treatment for Complex Native Coronary Artery Disease) trial. *JACC Cardiovasc Interv* 2013;6:10-19. doi: 10.1016/j.jcin.2012.07.017

42. Tomey M.I., Kini A.S., Sharma S.K. Current status of rotational atherectomy. *JACC Cardiovasc Interv* 2014;7:345-353. doi: 10.1016/j.jcin.2013.12.196

43. Abdel-Wahab M., Toelg R., Byrne R.A., Geist V., El-Mawardy M., Allali A., Rheude T., Robinson D.R., Abdelghani M., Sulimov D.S., Kastrati A., Richardt G. High-speed rotational atherectomy versus modified balloons prior to drug-eluting stent implantation in severely calcified coronary lesions. *Circ Cardiovasc Interv* 2018;11:e007415. doi: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.118.007415

44. Amemiya K., Yamamoto M.H., Maehara A., Oyama Y., Igawa W., Ono M., Kido T., Ebara S., Okabe T., Yamashita K., Hoshimoto K., Saito S., Yakushiji T., Isomura N., Araki H., Mintz G.S., Ochiai M. Effect of cutting balloon after rotational atherectomy in severely calcified coronary artery lesions as assessed by optical coherence tomography. *Catheter Cardiovasc Interv* 2019. doi: 10.1002/ccd.28278

45. Parikh K., Chandra P., Choksi N., Khanna P., Chambers J. Safety and feasibility of orbital atherectomy for the treatment of calcified coronary lesions: the ORBIT I trial. *Catheter Cardiovasc Interv* 2013;81:1134–9. doi: 10.1002/ccd.24700.

46. Chambers J.W., Feldman R.L., Himmelstein S.I., Bhatheja R., Villa A.E., Strickman N.E., Shlofmitz R.A., Dulas D.D., Arab D., Khanna P.K., Lee A.C., Ghali M.G., Shah R.R., Davis T.P., Kim C.Y., Tai Z., Patel K.C., Puma J.A., Makam P., Bertolet B.D., Nseir G.Y. Pivotal trial to evaluate the safety and efficacy of the orbital atherectomy system in treating de novo, severely calcified coronary lesions (ORBIT II). *JACC Cardiovasc Interv* 2014;7:510–8. doi: 10.1016/j.jcin.2014.01.158

47. Bilodeau L., Fretz E.B., Taeymans Y., Koolen J., Taylor K., Hilton D.J. Novel use of a high-energy excimer laser catheter for calcified and complex coronary artery lesions. *Catheter Cardiovasc Interv* 2004;62:155–61. doi: 10.1002/ccd.20053

48. Fernandez J.P., Hobson A.R., McKenzie D., Shah N., Sinha M.K., Wells T.A., Levy T.M., Swallow R.A., Talwar S., O'Kane P.D. Beyond the balloon: excimer coronary laser atherectomy used alone or in combination with rotational atherectomy in the treatment of chronic total occlusions, non-crossable and non-expandable coronary lesions. *EuroIntervention* 2013;9:243–50. doi: 10.4244/EIJV9I2A40.

49. Lee T., Shlofmitz R.A., Song L., Tsiamtsiouris T., Pappas T., Madrid A., Jeremias A., Haag E.S., Ali Z.A., Moses J.W., Matsumura M., Mintz G.S., Maehara A. The effectiveness of excimer laser angioplasty to treat coronary in-stent restenosis with peri-stent calcium as assessed by optical coherence tomography. *EuroIntervention* 2019;15:e279–88. doi: 10.4244/EIJ-D-18-00139

50. Kereiakes D.J., Di Mario C., Riley R.F., Fajadet J., Shlofmitz R.A., Saito S., Ali Z.A., Klein A.J., Price M.J., Hill J.M., Stone G.W. Intravascular Lithotripsy for Treatment of Calcified Coronary Lesions: Patient-Level Pooled Analysis of the Disrupt CAD Studies. *JACC Cardiovasc Interv* 2021;14(12):1337-1348. doi: 10.1016/j.jcin.2021.04.015.

51. Ertelt K., Genereux P., Mintz G.S., Reiss G.R., Kirtane A.J., Madhavan M.V., Fahy M., Williams M.R., Brener S.J., Mehran R., Stone G.W. Impact of the severity of coronary artery calcification on clinical events in patients undergoing coronary artery bypass grafting (from the Acute Catheterization and Urgent Intervention Triage Strategy Trial). *Am J Cardiol* 2013;112:1730–1737. doi: 10.1016/j.amjcard.2013.07.038

REFERENCES

1. Genereux P., Madhavan M.V., Mintz G.S., Maehara A., Palmerini T., Lasalle L., Xu K., McAndrew T., Kirtane A., Lansky A.J., Brener S.J., Mehran R., Stone G.W. Ischemic outcomes after coronary intervention of calcified vessels in acute coronary syndromes: pooled analysis from the HORIZONS-AMI (harmonizing outcomes with revascularization and stents in acute myocardial infarction) and ACUITY (acute catheterization and urgent intervention triage strategy) trials. *J Am Coll Cardiol*. 2014;63:1845–1854. doi: 10.1016/j.jacc.2014.01.034.

2. Kastrati A., Schömig A., Elezi S., Schühlen H., Dirschinger J., Hadamitzky M., Wehinger A., Hausleiter J., Walter H., Neumann F.J. Predictive factors of restenosis after coronary stent placement. *J Am Coll Cardiol*. 1997;30:1428–36 as diabetes. doi: 10.1016/s0735-1097(97)00334-3

3. Huisman J., van der Heijden L.C., Kok M.M., Louwerenburg J.H., Danse P.W., Jessurun G.A., de Man F.H., Löwik M.M., Linssen G.C., IJzerman M.J., Doggen C.J., von Birgelen C. Two-year outcome after treatment of severely calcified lesions with newer-generation drug-eluting stents in acute coronary syndromes: a patient-level pooled analysis from TWENTE and DUTCH PEERS. *J Cardiol* 2017;69:660–5. doi: 10.1016/j.jjcc.2016.06.010.

4. Copeland-Halperin R.S., Baber U., Aquino M., Rajamanickam A., Roy S., Hasan C., Barman N., Kovacic J.C., Moreno P., Krishnan P., Sweeny J.M., Mehran R., Dangas G., Kini A.S., Sharma S.K. Prevalence, correlates, and impact of

coronary calcification on adverse events following PCI with newer-generation DES: findings from a large multiethnic registry. *Catheter Cardiovasc Interv* 2018;91:859–66. doi: 10.1002/ccd.27204

5. Wang F., Rozanski A., Dey D., Arnson Y., Gransar H., Friedman J., Hayes S.W., Thomson L.E.J., Tamarappoo B., Shaw L.J., Min J.K., Rumberger J.A., Budoff M.J., Miedema M.D., Blaha M.J., Berman D.S. Age- and gender-adjusted percentiles for number of calcified plaques in coronary artery calcium scanning. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2018.S1934-5925(18)30308-3. doi: 10.1016/j.jcct.2018.12.001.

6. Shaw L.J., Narula J., Chandrashekhara Y. The never-ending story on coronary calcium: is it predictive, punitive, or protective? *J Am Coll Cardiol* 2015;65:1283-1285. doi: 10.1016/j.jacc.2015.02.024

7. Nakahara T., Dweck M.R., Narula N., Pisapia D., Narula J., Strauss H.W. Coronary artery calcification: from mechanism to molecular imaging. *JACC Cardiovasc Imaging* 2017;10:582–9. doi: 10.1016/j.jcmg.2017.03.005

8. Dhore C.R., Cleutjens J.P., Lutgens E., Cleutjens K.B., Geusens P.P., Kitslaar P.J., Tordoir J.H., Spronk H.M., Vermeer C., Daemen M.J. Differential expression of bone matrix regulatory proteins in human atherosclerotic plaques. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*. 2001;21(12):1998-2003. doi:10.1161/hq1201.100229

9. Génereux P., Redfors B., Witzensbichler B., Arsenaault M.P., Weisz G., Stuckey T.D., Rinaldi M.J., Neumann F.J.,

Christopher Metzger D., Henry T.D., Cox D.A., Duffy P.L., Mazzaferri E.L. Jr., Francese D.P., Marquis-Gravel G., Mintz G.S., Kirtane A.J., Maehara A., Mehran R., Stone G.W. Two-year outcomes after percutaneous coronary intervention of calcified lesions with drug-eluting stents. *Int J Cardiol* 2017;231:61–7. doi: 10.1016/j.ijcard.2016.12.150.

10. Sharma S.K., Tomey M.I., Teirstein P.S., Kini A.S., Reitman A.B., Lee A.C., G  n  reux P., Chambers J.W., Grines C.L., Himmelstein S.I., Thompson C.A., Meredith I.T., Bhav   A., Moses J.W.. North American expert review of rotational atherectomy. *Circ Cardiovasc Interv*. 2019; 12:e007448. doi: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.118.007448

11. Kang S.-J. Intravascular ultrasound-derived criteria for optimal stent expansion and preprocedural prediction of stent underexpansion. *Circ Cardiovasc Interv*. 2021; 14: e011374. doi: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.121.011374.

12. Mintz G.S., Guagliumi G. Intravascular imaging in coronary artery disease. *Lancet* 2017;390:793–809. doi: 10.1016/S0140-6736(17)31957-8

13. Busse A., Cantr   D., Beller E., Streckenbach F.,   ner A., Ince H., Weber M.A., Meinel F.G. Cardiac CT: why, when, and how: update 2019. *Radiologe*. 2019; 59 (Suppl 1):1-9. doi: 10.1007/s00117-019-0530-9

14. Faggiano P., Dasseni N., Gaibazzi N., Rossi A., Henein M., Pressman G. Cardiac calcification as a marker of subclinical atherosclerosis and predictor of cardiovascular events: a review of the evidence. *Eur J Prev Cardiol* 2019;26:1191–204. doi: 10.1177/2047487319830485

15. Polak J. F., Tracy R., Harrington A., Zavodni A. E. H., O'Leary D. H. Carotid artery plaque and progression of coronary artery calcium: The multi-ethnic study of atherosclerosis. *J Am Soc Echocardiogr*. 2013;26(5):548-55. doi: 10.1016/j.echo.2013.02.009.

16. Tuzcu E.M., Berkalp B., De Franco A.C., Ellis S.G., Goormastic M., Whitlow P.L., Franco I., Raymond R.E., Nissen S.E. The dilemma of diagnosing coronary calcification: angiography versus intravascular ultrasound. *J Am Coll Cardiol*. 1996;27:832-838. doi: 10.1016/0735-1097(95)00537-4

17. Kubo T., Akasaka T., Shite J., Suzuki T., Uemura S., Yu B., Kozuma K., Kitabata H., Shinke T., Habara M., Saito Y., Hou J., Suzuki N., Zhang S. OCT compared with IVUS in a coronary lesion assessment: the OPUS-CLASS study. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2013;6(10):1095-1104. doi: 10.1016/j.jcmg.2013.04.014.

18. Mintz G.S., Popma J.J., Pichard A.D., Kent K.M., Satler L.F., Chuang Y.C., Ditrano C.J., Leon M.B. Patterns of calcification in coronary artery disease. A statistical analysis of intravascular ultrasound and coronary angiography in 1155 lesions. *Circulation* 1995;91:1959-1965. doi: 10.1161/01.cir.91.7.1959

19. R  ber L., Mintz G.S., Koskinas K.C., Johnson T.W., Holm N.R., Onuma Y., Radu M.D., Joner M., Yu B., Jia H., Meneveau N., de la Torre Hernandez J.M., Escaned J., Hill J., Prati F., Colombo A., di Mario C., Regar E., Capodanno D., Wijns W., Byrne R.A., Guagliumi G.; ESC Scientific Document Group. Clinical use of intracoronary imaging. Part 1: guidance and optimization of coronary interventions. An expert consensus document of the European Association of Percutaneous Cardiovascular Interventions. *Eur Heart J*. 2018;39(35):3281-3300. doi:10.1093/eurheartj/ehy285

20. Hong S.-J., Kim B.-K., Shin D.-H., Nam C.-M., Kim J.-S., Ko Y.-G., Choi D., Kang T.-S., Kang W.-C., Her A.-Y., Kim Y.H., Kim Y., Hur S.-H., Hong B.-K., Kwon H., Jang Y., Hong M.-K. Effect of intravascular ultrasound-guided vs angiography-guided everolimus-eluting stent implantation: the IVUS-XPL Randomized Clinical Trial. *JAMA* 2015;314:2155–2163. doi:10.1001/jama.2015.15454

21. Kim B.-K., Shin D.-H., Hong M.-K., Park H.S., Rha S.-W., Mintz G.S., Kim J.-S., Kim J.S., Lee S.-J., Kim H.-Y., Hong B.-K., Kang W.-C., Choi J.-H., Jang Y. Clinical impact of intravascular ultrasound-guided chronic total

occlusion intervention with zotarolimus-eluting versus biolimus-eluting stent implantation: randomized study. *Circ Cardiovasc Interv* 2015;8:e002592. doi: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.115.002592

22. Wang X., Matsumura M., Mintz G.S., Lee T., Zhang W., Cao Y., Fujino A., Lin Y., Usui E., Kanaji Y., Murai T., Yonetsu T., Kakuta T., Maehara A. In vivo calcium detection by comparing optical coherence tomography, intravascular ultrasound, and angiography. *Am J Coll Cardiol Imaging* 2017;10:869–79. doi: 10.1016/j.jcmg.2017.05.014

23. Ali Z.A., Maehara A., G  n  reux P., Shlofmitz R.A., Fabbrocchi F., Nazif T.M., Guagliumi G., Meraj P.M., Alfonso F., Samady H., Akasaka T., Carlson E.B., Leeser M.A., Matsumura M., Ozan M.O., Mintz G.S., Ben-Yehuda O., Stone G.W. Optical coherence tomography compared with intravascular ultrasound and with angiography to guide coronary stent implantation (ILUMIEN III: oPTIMIZE PCI): a randomised controlled trial. *Lancet* 2016;388:2618–2628. doi: 10.1093/eurheartj/ehx351

24. Fujino A., Mintz G.S., Matsumura M., Lee T., Kim S.Y., Hoshino M., Usui E., Yonetsu T., Haag E.S., Shlofmitz R.A., Kakuta T., Maehara A. A new optical coherence tomography-based calcium scoring system to predict stent underexpansion. *EuroIntervention* 2018;13:e2182–9. doi: 10.4244/EIJ-D-17-00962

25. Zhang M., Matsumura M., Usui E., Noguchi M., Fujimura T., Fall K., et al. IVUS predictors of stent expansion in severely calcified lesions. *J Am Coll Cardiol*. 2019;74(suppl.13):B51 doi:10.1016/j.jacc.2019.08.083

26. Sotomi Y., Onuma Y., Dijkstra J., Miyazaki Y., Kozuma K., Tanabe K., Popma J.J., de Winter R.J., Serruys P.W., Kimura T. Fate of post-procedural malapposition of everolimus-eluting polymeric bioresorbable scaffold and everolimus-eluting cobalt chromium metallic stent in human coronary arteries: sequential assessment with optical coherence tomography in ABSORB Japan trial *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2018;19:59–66. doi: 10.1093/ehjci/jew329

27. Schmermund A., Achenbach S., Budde T., Buziashvili Y., F  rster A., Friedrich G., Henein M., Kerkhoff G., Knollmann F., Kukharchuk V., Lahiri A., Leischik R., Moshage W., Scharthl M., Siffert W., Steinhagen-Thiessen E., Sinitsyn V., Vogt A., Wiedeking B., Erbel R. Effect of intensive versus standard lipid-lowering treatment with atorvastatin on the progression of calcified coronary atherosclerosis over 12 months: a multicenter, randomized, double blind trial. *Circulation*. 2006;113:427-43. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.105.568147

28. McEvoy J.W., Blaha M.J., DeFilippis A.P., Lima J.A., Bluemke D.A., Hundley W.G., Min J.K., Shaw L.J., Lloyd-Jones D.M., Barr R.G., Budoff M.J., Blumenthal R.S., Nasir K. Cigarette smoking and cardiovascular events: role of inflammation and subclinical atherosclerosis from the MultiEthnic Study of Atherosclerosis. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*. 2015;35(3):700-9 doi: 10.1161/ATVBAHA.114.304562

29. An T., Hao J., Sun S., Li R., Yang M., Cheng G., Zou M. Efficacy of statins for osteoporosis: a systematic review and meta-analysis. *Osteoporos Int*. 2017;28(1):47-57. doi: 10.1007/s00198-016-3844-8

30. Kashtalap V.V., Khryachkova O.N., Barbarash O.L. "New" pathological continuum: hypogonadism, osteoporosis and calcific atherosclerosis. General factors of formation and progression. *Atherosclerosis*. 2016; 12 (4): 68-78 (In Russian)

31. Riley RF, Patel MP, Abbott JD, et al. SCAI expert consensus statement on the management of calcified coronary lesions. *J Soc Cardiovasc Angiogr Interv*. 2024; 3(2):101259. doi:10.1016/j.jscai.2023.101259

32. Costopoulos C., Naganuma T., Colombo A. Tools and techniques clinical: percutaneous intervention of calcific coronary lesions. *EuroIntervention* 2014;9:1124–6. doi: 10.4244/EIJV9I9A188.

33. Zhu X., Umezu .M, Iwasaki K. Finite element analysis of cutting balloon expansion in a calcified artery model of

circular angle 180°: Effects of balloon-to-diameter ratio and number of blades facing calcification on potential calcification fracturing and perforation reduction. PLoS ONE. 2021; 16(5): e0251404. doi: 10.1371/journal.pone.0251404

34. Jujo K., Saito K., Ishida I., Kim A., Suzuki Y., Furuki Y., Ouchi T., Ishii Y., Sekiguchi H., Yamaguchi J., Ogawa H., Hagiwara N. Intimal disruption affects drug-eluting cobalt-chromium stent expansion: a randomized trial comparing scoring and conventional balloon predilation. Int J Cardiol 2016;221:23–31. doi: 10.1016/j.ijcard.2016.07.002

35. Reifart N., Vandormael M., Krajcar M., Göhring S., Preusler W., Schwarz F., Störger H., Hofmann M., Klöpper J., Müller S., Haase J. Randomized comparison of angioplasty of complex coronary lesions at a single center. Excimer Laser, Rotational Atherectomy, and Balloon Angioplasty Comparison (ERBAC) Study. Circulation 1997;96:91–8. doi: 10.1161/01.cir.96.1.91

36. Barbato E., Carrie D., Dardas P., Fajadet J., Gaul G., Haude M., Khashaba A., Koch K., Meyer-Gessner M., Palazuelos J., Reczuch K., Ribichini F.L., Sharma S., Sipotz J., Sjogren I., Suetsch G., Szabo G., Valdes-Chavarri M., Vaquerizo B., Wijns W., Windecker S., de Belder A., Valgimigli M., Byrne R.A., Colombo A., Di Mario C., Latib A., Hamm C. European expert consensus on rotational atherectomy. EuroIntervention. 2015;11(1):30–6. doi: 10.4244/EIJV11I1A6.

37. Sakakura K., Ito Y., Shibata Y., Okamura A., Kashima Y., Nakamura S., Hamazaki Y., Ako J., Yokoi H., Kobayashi Y., Ikari Y. Clinical expert consensus document on rotational atherectomy from the Japanese association of cardiovascular intervention and therapeutics. Cardiovasc Interv and Ther 36, 1–18 (2021). doi: 10.1007/s12928-020-00715-w

38. Iannaccone M., Piazza F., Boccuzzi G.G., D'Ascenzo F., Latib A., Pennacchi M., Rossi M.L., Ugo F., Meliga E., Kawamoto H., Moretti C., Ielasi A., Garbo R., Frangieh A.H., Hildick-Smith D., Templin C., Colombo A., Sardella G. ROTational ATHERectomy in acute coronary syndrome: early and midterm outcomes from a multicentre registry. EuroIntervention 2016;12:1457–64. doi: 10.4244/EIJ-D-15-00485

39. Ritchie J.L., Hansen D.D., Intlekofer M.J., Hall M., Auth D.C. Rotational approaches to atherectomy and thrombectomy. Z Kardiol 1987;76(Suppl 6):59-65

40. Ellis S.G., Popma J.J., Buchbinder M., Franco I., Leon M.B., Kent K.M., Pichard A.D., Satler L.F., Topol E.J., Whitlow P.L. Relation of clinical presentation, stenosis morphology, and operator technique to the procedural results of rotational atherectomy and rotational atherectomy-facilitated angioplasty. Circulation 1994;89:882-892. doi: 10.1161/01.cir.89.2.882

41. Abdel-Wahab M., Richardt G., Joachim Buttner H., Toelg R., Geist V., Meinertz T., Schofer J., King L., Neumann F.J., Khatatb A.A. High-speed rotational atherectomy before paclitaxel-eluting stent implantation in complex calcified coronary lesions: the randomized ROTAXUS (Rotational Atherectomy Prior to Taxus Stent Treatment for Complex Native Coronary Artery Disease) trial. JACC Cardiovasc Interv 2013;6:10-19. doi: 10.1016/j.jcin.2012.07.017

42. Tomey M.I., Kini A.S., Sharma S.K. Current status of rotational atherectomy. JACC Cardiovasc Interv 2014;7:345-353. doi: 10.1016/j.jcin.2013.12.196

43. Abdel-Wahab M., Toelg R., Byrne R.A., Geist V., El-Mawardy M., Allali A., Rheude T., Robinson D.R., Abdelghani M., Sulimov D.S., Kastrati A., Richardt G. High-speed rotational atherectomy versus modified balloons prior to drug-eluting stent implantation in severely calcified coronary lesions. Circ Cardiovasc Interv 2018;11:e007415. doi: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.118.007415

44. Amemiya K., Yamamoto M.H., Maehara A., Oyama Y., Igawa W., Ono M., Kido T., Ebara S., Okabe T., Yamashita K., Hoshimoto K., Saito S., Yakushiji T., Isomura N., Araki H., Mintz G.S., Ochiai M. Effect of cutting balloon after rotational atherectomy in severely calcified coronary artery lesions as assessed by optical coherence tomography. Catheter Cardiovasc Interv 2019. doi: 10.1002/ccd.28278

45. Parikh K., Chandra P., Choksi N., Khanna P., Chambers J. Safety and feasibility of orbital atherectomy for the treatment of calcified coronary lesions: the ORBIT I trial. Catheter Cardiovasc Interv 2013;81:1134–9. doi: 10.1002/ccd.24700.

46. Chambers J.W., Feldman R.L., Himmelstein S.I., Bhatheja R., Villa A.E., Strickman N.E., Shlofmitz R.A., Dulas D.D., Arab D., Khanna P.K., Lee A.C., Ghali M.G., Shah R.R., Davis T.P., Kim C.Y., Tai Z., Patel K.C., Puma J.A., Makam P., Bertolet B.D., Nseir G.Y. Pivotal trial to evaluate the safety and efficacy of the orbital atherectomy system in treating de novo, severely calcified coronary lesions (ORBIT II). JACC Cardiovasc Interv 2014;7:510–8. doi: 10.1016/j.jcin.2014.01.158

47. Bilodeau L., Fretz E.B., Taeymans Y., Koolen J., Taylor K., Hilton D.J. Novel use of a high-energy excimer laser catheter for calcified and complex coronary artery lesions. Catheter Cardiovasc Interv 2004;62:155–61. doi: 10.1002/ccd.20053

48. Fernandez J.P., Hobson A.R., McKenzie D., Shah N., Sinha M.K., Wells T.A., Levy T.M., Swallow R.A., Talwar S., O'Kane P.D. Beyond the balloon: excimer coronary laser atherectomy used alone or in combination with rotational atherectomy in the treatment of chronic total occlusions, non-crossable and non-expandable coronary lesions. EuroIntervention 2013;9:243–50. doi: 10.4244/EIJV9I2A40.

49. Lee T., Shlofmitz R.A., Song L., Tsiamtsiouris T., Pappas T., Madrid A., Jeremias A., Haag E.S., Ali Z.A., Moses J.W., Matsumura M., Mintz G.S., Maehara A. The effectiveness of excimer laser angioplasty to treat coronary in-stent restenosis with peri-stent calcium as assessed by optical coherence tomography. EuroIntervention 2019;15:e279–88. doi: 10.4244/EIJ-D-18-00139

50. Kereiakes D.J., Di Mario C., Riley R.F., Fajadet J., Shlofmitz R.A., Saito S., Ali Z.A., Klein A.J., Price M.J., Hill J.M., Stone G.W. Intravascular Lithotripsy for Treatment of Calcified Coronary Lesions: Patient-Level Pooled Analysis of the Disrupt CAD Studies. JACC Cardiovasc Interv. 2021;14(12):1337-1348. doi: 10.1016/j.jcin.2021.04.015.

51. Ertelt K., Genereux P., Mintz G.S., Reiss G.R., Kirtane A.J., Madhavan M.V., Fahy M., Williams M.R., Brener S.J., Mehran R., Stone G.W. Impact of the severity of coronary artery calcification on clinical events in patients undergoing coronary artery bypass grafting (from the Acute Catheterization and Urgent Intervention Triage Strategy Trial). Am J Cardiol 2013;112:1730–1737. doi: 10.1016/j.amjcard.2013.07.038

Для цитирования: Цыденова А.Ю., Баранов А.А., Найденов Р.А., Ибрагимов Р.У., Гранкин Д.С., Крестянинов О.В. Кальциноз коронарных артерий: роль визуализирующих методов диагностики, современные способы лечения. Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. 2024;13(2): 101-115. DOI: 10.17802/2306-1278-2024-13-2-101-115

To cite: Tsydenova A.Yu., Baranov A.A., Naydenov R.A., Ibragimov R.U., Grankin D.S., Krestyaninov O.V. Coronary artery calcification: intracoronary imaging, contemporary technologies of treatment. Complex Issues of Cardiovascular Diseases. 2024;13(2): 101-115. DOI: 10.17802/2306-1278-2024-13-2-101-115