УДК 616.379-008.64:616.13-004.6:616.718:617.586-002.4-089.86
https://doi.org/10.31612/2616-4868.5.2026.04

КЛІНІЧНЕ ЗНАЧЕННЯ АНГІОСОМНОЇ КОНЦЕПЦІЇ ПРИ РЕВАСКУЛЯРИЗАЦІЇ У ПАЦІЄНТІВ З ІШЕМІЧНОЮ ФОРМОЮ СИНДРОМУ ДІАБЕТИЧНОЇ СТОПИ

Юрій М. Гупало[1], Данило Ю. Шаповалов[1], Дмитро А. Маківчук[1], Олена Є. Швед[1], Сергій М. Діденко[2]

[1]Державна наукова установа «Центр інноваційних технологій охорони здоров'я» Державного управління справами, м. Київ, Україна
[2]Клінічна лікарня «Феофанія» Державного управління справами, м. Київ, Україна

Резюме

Мета. Обґрунтувати та оцінити клінічну доцільність інтегрованого підходу при реваскуляризації у пацієнтів з ішемічною формою синдрому діабетичної стопи на основі ангіосомної концепції.
Матеріали та методи. Проведено ретроспективне аналітичне дослідження двох взаємодоповнювальних клінічних масивів. Перший включав 98 реваскуляризацій 77 нижніх кінцівок у 74 пацієнтів з ішемічною формою синдрому діабетичної стопи, із розподілом втручань на прямі та непрямі відповідно до ангіосомної теорії. Другий включав 137 пацієнтів із цукровим діабетом 2 типу, ішемічною формою синдрому діабетичної стопи, стенотично-оклюзійним ураженням артерій гомілкового сегмента та некрозами стопи ішемічного генезу, яким виконано балонну ангіопластику з інтраопераційним вимірюванням дебіту підколінної артерії, визначенням $TcPO_2$ і оцінкою варіанта реваскуляризації за ангіосомною концепцією.
Результати. У групі прямої ангіосомно-орієнтованої реваскуляризації загоєння трофічних уражень протягом 6 місяців досягнуто у 81,7% випадків, у групі непрямої – у 78,6%. Частота високих ампутацій була нижчою після прямої реваскуляризації – 12,4% проти 36,8% після непрямої. Уникнення високої ампутації протягом року становило відповідно 87,6% і 66,7%, а функціональну спроможність кінцівки збережено у 79,3% і 57,9% пацієнтів. У другому клінічному масиві приріст дебіту підколінної артерії після балонної ангіопластики мав чіткий зв'язок із загоєнням ран стопи: при збільшенні дебіту до 1,5 раза повне загоєння через 3 місяці спостерігалося у 3,5% пацієнтів, при приростi у 1,5-2 рази – у 50,0%, а при приростi більше ніж у 2 рази – у 82,8%. Інтегрована бальна оцінка, що враховувала приріст дебіту, $TcPO_2$ і варіант ангіосомної реваскуляризації, дозволила стратифікувати пацієнтів за ймовірністю загоєння рани та потребою у зміні лікувальної тактики.
Висновки. Ангіосомно-орієнтована реваскуляризація у пацієнтів з ішемічною формою синдрому діабетичної стопи асоціюється зі зниженням частоти високих ампутацій, вищою ймовірністю збереження функціональної спроможності кінцівки та кращими показниками уникнення ампутації протягом року. Ангіосомна відповідність є важливим, але недостатнім критерієм клінічної ефективності реваскуляризації, оскільки непряма реваскуляризація також покращує загоєння ран. Інтегрована бальна модель, що поєднує приріст дебіту підколінної артерії, $TcPO_2$ і варіант реваскуляризації за ангіосомною концепцією, може використовуватися для ранньої стратифікації пацієнтів за ймовірністю загоєння рани та вибору подальшої тактики лікування.

Ключові слова: **синдром діабетичної стопи, хронічна загрозлива ішемія кінцівки, ангіосома, реваскуляризація, балонна ангіопластика, інтраопераційна дебітометрія, загоєння ран, ампутація**

ВСТУП

Цукровий діабет є одним із провідних системних чинників розвитку захворювання периферичних артерій, а його тривалий перебіг асоціюється з багаторівневим ураженням судинного русла нижніх кінцівок, переважно артерій малого та середнього калібру [1, 2]. Найбільш клінічно значущим наслідком такого ураження є ішемічна форма синдрому діабетичної стопи, яка поєднує макроангіопатію, мікроциркуляторну недостатність, діабетичну нейропатію, інфекційно-некротичні ускладнення та високий ризик втрати опорної функції кінцівки [3, 4].

Хронічна загрозлива ішемія нижньої кінцівки у пацієнтів із цукровим діабетом має несприятливий природний перебіг. Без своєчасного відновлення кровотоку зростає ризик прогресування некрозу, високої ампутації, повторних госпіталізацій і смерті [2, 5]. Висока ампутація у таких хворих не є лише хірургічним наслідком локального ураження: вона істотно погіршує якість життя, знижує мобільність, підвищує потребу в довготривалій реабілітації та супроводжується високою віддаленою летальністю [6, 7].

Сучасна судинна хірургія поступово відходить від формального ангіографічного критерію «відновлення прохідності артерії» до клінічно орієнтованого критерію «відновлення достатньої перфузії зони ранового дефекту». У пацієнтів із діабетичною стопою це має принципове значення, оскільки технічно успішна реваскуляризація не завжди забезпечує загоєння рани, якщо відновлений кровотік не спрямований до ураженої анатомічної ділянки або не супроводжується достатнім приростом тканинної оксигенації [8, 9].

Ангіосомна концепція ґрунтується на анатомо-фізіологічному принципі сегментарного кровопостачання тканин через відповідні артеріальні басейни. Для стопи це означає, що рановий дефект або зона некрозу можуть мати конкретну артеріальну «ціль», а відновлення кровотоку саме через цю артерію потенційно створює кращі умови для репарації тканин [10, 11]. Міжнародні рекомендації щодо ведення пацієнтів із цукровим діабетом і виразкою стопи підкреслюють доцільність відновлення кровотоку щонайменше в одну артерію стопи, бажано в ту, що кровопостачає уражену ділянку [1, 12].

Разом із тим ангіосомна відповідність не може розглядатися як єдиний критерій ефективності втручання. Клінічна достатність реваскуляризації залежить також від кількісного приросту магістрального кровотоку та від реальної тканинної оксигенації в зоні ураження [13, 14]. Саме тому особливий інтерес становить поєднання ангіосомної концепції з інтраопераційною дебітометрією та черезшкірним визначенням парціального тиску кисню в тканинах стопи. Такий підхід дозволяє оцінити не лише анатомічну спрямованість реваскуляризації, а й її функціональний результат.

Наукова проблема полягає у створенні практично придатного алгоритму, який дає змогу після реваскуляризації відповісти на ключове клінічне питання: чи має конкретний пацієнт достатній перфузійний резерв для загоєння рани, чи необхідно рано переходити до повторної реваскуляризації, шунтування або ампутації на функціонально обґрунтованому рівні.

МЕТА

Обґрунтувати та оцінити клінічну доцільність інтегрованого підходу при реваскуляризації у пацієнтів з ішемічною формою синдрому діабетичної стопи на основі ангіосомної концепції.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Проведено ретроспективне аналітичне дослідження двох клінічних масивів пацієнтів з ішемічною формою синдрому діабетичної стопи. Перший масив включав 74 пацієнти, яким у 2014-2019 рр. виконано 98 реваскуляризацій 77 нижніх кінцівок. Втручання було класифіковано як прямі або непрямі відповідно до ангіосомної теорії. Прямою реваскуляризацією вважали відновлення кровотоку через артерію, що безпосередньо кровопостачає ангіосому ранового дефекту; непрямою – відновлення кровотоку через іншу артерію з розрахунком на колатеральне кровопостачання.

Другий масив включав 137 пацієнтів із цукровим діабетом 2 типу, ішемічною формою синдрому діабетичної стопи, стенотично-оклюзійним ураженням артерій гомілкового сегмента та некрозами стопи ішемічного генезу, які проходили лікування у 2014-2022 рр. Усім пацієнтам виконували балонну ангіопластику артерій гомілкового сегмента з інтраопераційним визначенням дебіту підколінної артерії до та після втручання. Через 3 доби після балонної ангіопластики визначали $TcPO_2$ у життєздатних тканинах поблизу зони некротичного ураження.

Критеріями включення були: ішемічне ураження стопи з наявністю некротичного або ранового дефекту, стенотично-оклюзійне ураження артерій гомілкового або гомілково-стопового сегмента, потенційна можливість збереження опорної функції кінцівки та наявність показань до реваскуляризації. *Критеріями виключення* були поширені гнійно-некротичні зміни з первинними показаннями до високої ампутації, гострий коронарний синдром або гостре порушення мозкового кровообігу протягом попередніх 6 місяців, прогнозована тривалість життя менше 12 місяців і відмова пацієнта від лікування.

Кінцевими точками були: загоєння ранового дефекту, уникнення високої ампутації, збереження функціональної спроможності кінцівки та потреба у повторній реваскуляризації. У першому масиві період спостереження становив 1 рік. У другому масиві загоєння ран оцінювали через 1 і 3 місяці після балонної ангіопластики та хірургічного лікування рани.

Для інтегрованої прогностичної оцінки використовували три компоненти: приріст дебіту підколінної артерії після балонної ангіопластики, рівень $TcPO_2$ та варіант реваскуляризації за ангіосомною концепцією. Статистичну значущість відмінностей оцінювали при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТИ

Перший клінічний масив включав 98 реваскуляризацій 77 нижніх кінцівок у 74 пацієнтів. Ангіопластику виконано у 71 випадку (72,5%), відкриті операції – у 21 (21,4%), гібридні втручання – у 6 (6,1%). Прямі ангіосомно-орієнтовані реваскуляризації становили 73 втручання, непрямі – 24. У двох випадках спроби ендоваскулярного відновлення кровотоку були технічно неуспішними.

У групі прямої реваскуляризації загоєння трофічних уражень протягом 6 місяців зафіксовано у 81,7% випадків, у групі непрямої – у 78,6%. Медіана терміну загоєння становила 3 місяці після прямої та 4 місяці після непрямої реваскуляризації. Статистично значущої різниці за частотою загоєння між групами не встановлено.

Таблиця 1

Загальна характеристика клінічних масивів дослідження

Показник	Масив ангіосомної реваскуляризації	Масив дебітометрії та $TcPO_2$
Період спостереження	2014-2019	2014-2022
Кількість пацієнтів	74	137
Кількість нижніх кінцівок	77	137
Основний метод оцінки	Пряма/непряма реваскуляризація	Дебіт ПКА, $TcPO_2$, ангіосомний варіант
Основна кінцева точка	Загоєння, ампутація, функція кінцівки	Загоєння рани через 1 і 3 міс.

Натомість частота високих ампутацій була істотно нижчою після прямої реваскуляризації. Високі ампутації виконано у 12,4% випадків у групі прямої реваскуляризації та у 36,8% – у групі непрямої. Уникнення високої ампутації протягом року становило відповідно 87,6% і 66,7%. Функціональну спроможність кінцівки протягом року збережено у 79,3% пацієнтів після прямої та у 57,9% після непрямої реваскуляризації.

Таблиця 2

Основні результати прямої та непрямої реваскуляризації

Показник	Пряма реваскуляризація	Непряма реваскуляризація
Загоєння уражень протягом 6 міс.	81,7%	78,6%
Високі ампутації	12,4%	36,8%
Уникнення високої ампутації протягом року	87,6%	66,7%
Збереження функціональної спроможності кінцівки	79,3%	57,9%
Повторні реваскуляризації	20,5%	25,0%

За даними багатофакторного аналізу, невідповідність ангіосомній концепції була асоційована з підвищенням ризику високої ампутації. Водночас вік, стать і метод реваскуляризації не мали самостійного статистично значущого впливу на ризик ампутації.

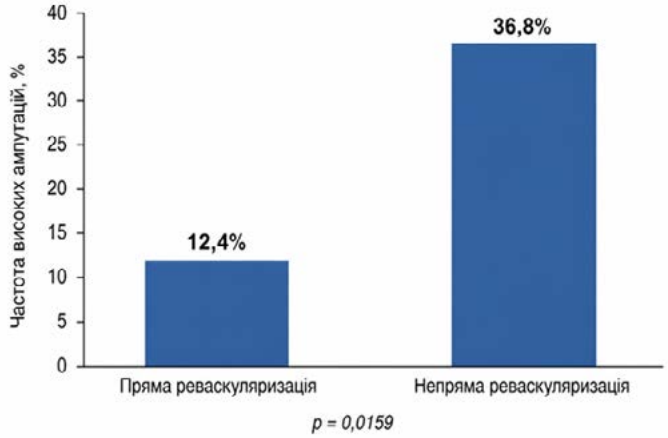

Рисунок 1. Частота високих ампутацій після прямої та непрямої реваскуляризації.

У другому клінічному масиві після балонної ангіопластики пацієнтів було розподілено на три групи залежно від приросту дебіту підколінної артерії: група А – приріст до 1,5 раза, 29 пацієнтів; група Б – приріст у 1,5-2 рази, 44 пацієнти; група В – приріст більше ніж у 2 рази, 64 пацієнти.

Через 3 доби після балонної ангіопластики у групі А переважали пацієнти з $TcPO_2$ 0-20 мм рт. ст.; у групі Б – з $TcPO_2$ 20-40 мм рт. ст.; у групі В – з $TcPO_2$ 40-60 мм рт. ст. Це свідчить про узгодженість приросту магістрального кровотоку з покращенням локальної тканинної оксигенації.

Таблиця 3

Рівень $TcPO_2$ залежно від приросту дебіту підколінної артерії

$TcPO_2$, мм рт. ст.	Група А: приріст до 1,5 раза	Група Б: приріст 1,5-2 рази	Група В: приріст >2 рази
0-20	19	2	1
20-40	8	32	20
40-60	2	10	43

Аналіз варіанта реваскуляризації за ангіосомною концепцією показав, що у групі А пряму реваскуляризацію не вдалося виконати жодному пацієнту; колатеральну – 5 пацієнтам; опосередковану – 24. У групі Б пряму реваскуляризацію виконано 16 пацієнтам, колатеральну – 22, опосередковану – 6. У групі В пряму реваскуляризацію виконано 54 пацієнтам, колатеральну – 8, опосередковану – 2.

Через 1 місяць після балонної ангіопластики повного загоєння ран у групі А не було досягнуто в жодного пацієнта; у групі Б повне загоєння спостерігалося у 12 пацієнтів, у групі В – у 45. Через 3 місяці повне загоєння ран було досягнуто в 1 пацієнта групи А, 22 пацієнтів групи Б і 53 пацієнтів групи В.

Частка повного загоєння ран через 3 місяці становила 3,5% у групі А, 50,0% у групі Б та 82,8% у групі В. Отже, збільшення дебіту підколінної артерії більше ніж у 2 рази після балонної ангіопластики було асоційоване з найвищою ймовірністю повного загоєння ран стопи.

Таблиця 4

Варіант реваскуляризації за ангіосомною концепцією

Варіант реваскуляризації	Група А	Група Б	Група В
Пряма	0	16	54
Колатеральна	5	22	8
Опосередкована	24	6	2

Таблиця 5

Загоєння ран стопи через 1 і 3 місяці після балонної ангіопластики

Варіант загоєння	Група А	Група Б	Група В
Повне через 1 міс.	0	12	45
Часткове через 1 міс.	4	15	10
Відсутнє через 1 міс.	25	17	9
Повне через 3 міс.	1	22	53
Часткове через 3 міс.	3	12	6
Відсутнє через 3 міс.	25	10	5

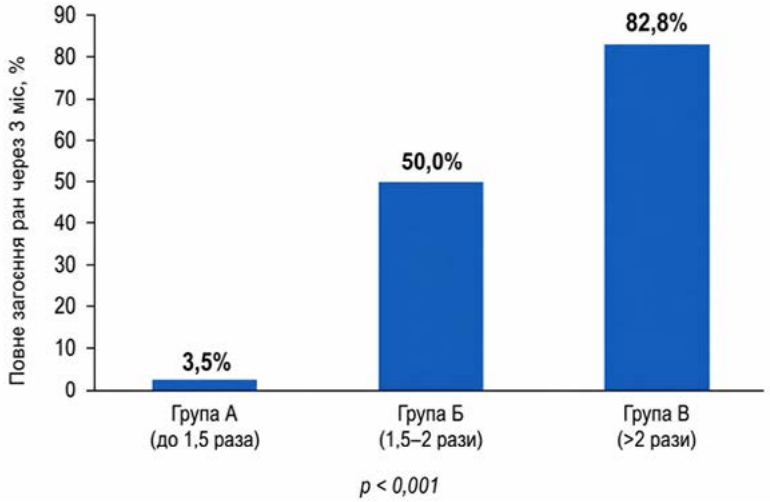

Рисунок 2. Частота повного загоєння ран стопи через 3 місяці залежно від приросту дебіту підколінної артерії.

Для практичної стратифікації пацієнтів запропоновано інтегровану бальну модель. Вона включає три критерії: приріст дебіту підколінної артерії, рівень $TcPO_2$ і варіант реваскуляризації за ангіосомною концепцією. Середня кількість балів на одного пацієнта становила 0,59 у групі А, 3,41 у групі Б та 5,47 у групі В. Сума 5-6 балів відповідала високій імовірності загоєння рани, 4 бали – помірній, 3 бали – низькій, менше 3 балів – несприятливому прогнозу.

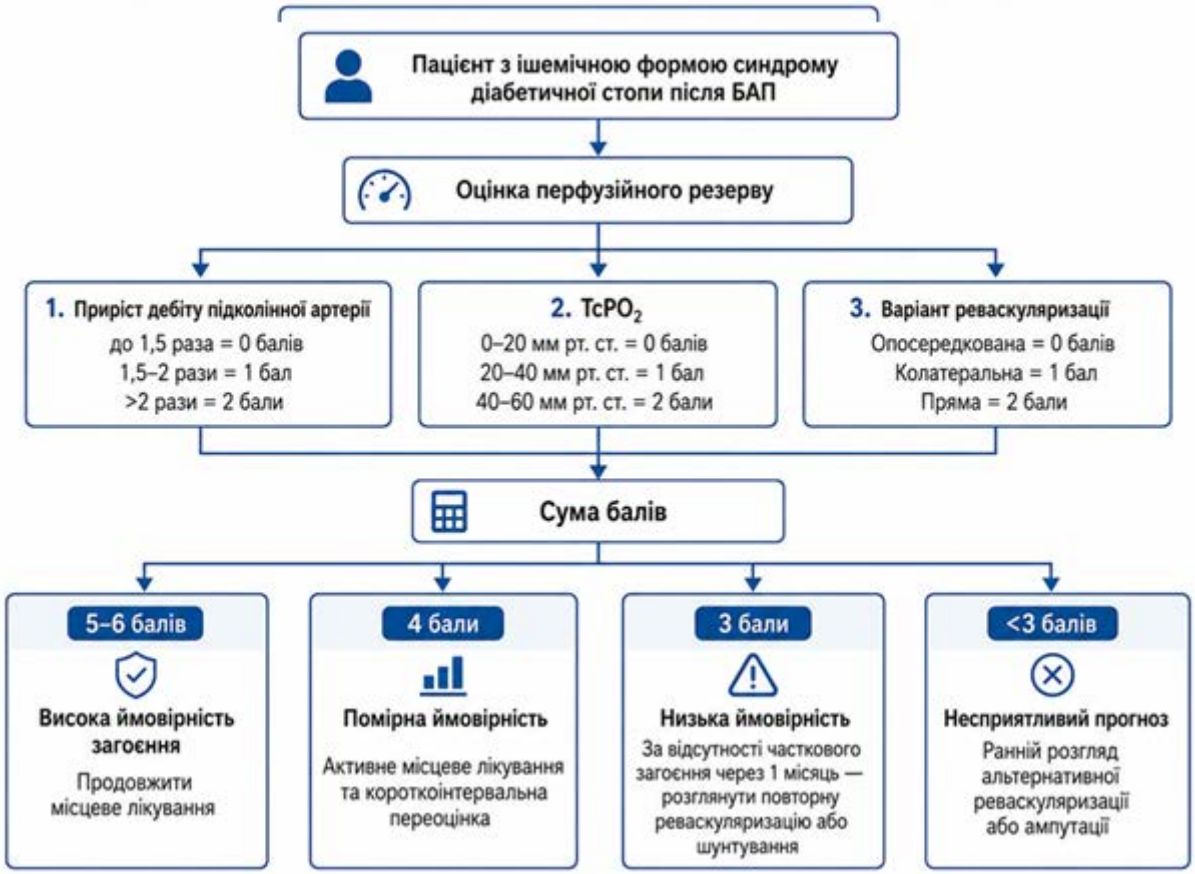

Рисунок 3. Інтегрований алгоритм прийняття рішень після балонної ангіопластики у пацієнтів з ішемічною формою синдрому діабетичної стопи.

ДИСКУСІЯ

Отримані результати підтверджують, що ангіосомно-орієнтована реваскуляризація має самостійне клінічне значення у лікуванні пацієнтів з ішемічною формою синдрому діабетичної стопи. Попри відносно близькі показники загоєння трофічних уражень після прямої та непрямої реваскуляризації, саме пряма реваскуляризація асоціювалася зі значно нижчою частотою високих ампутацій і вищою частотою збереження функціональної спроможності кінцівки. Це узгоджується з положеннями сучасних міжнародних рекомендацій, у яких підкреслюється необхідність відновлення кровотоку до артеріального басейну, що кровопостачає зону ранового дефекту [1, 2, 12].

Водночас відсутність статистично значущої різниці у частоті загоєння ран між групами прямої та непрямої реваскуляризації свідчить про те, що ангіосомна відповідність не є універсальним предиктором репарації тканин. Загоєння діабетичної рани є багатофакторним процесом, який залежить не лише від анатомічної спрямованості кровотоку, а й від об'єму відновленої перфузії, стану мікроциркуляції, рівня тканинної оксигенації, інфекційного контролю, глибини некрозу та якості місцевого лікування [8, 13, 14].

У цьому контексті інтраопераційна дебітометрія має важливу додаткову цінність. Вона дозволяє кількісно оцінити приріст магістрального кровотоку безпосередньо після балонної ангіопластики. У представленому матеріалі найкращі результати загоєння ран спостерігалися у пацієнтів, у яких дебіт підколінної артерії збільшувався більше ніж у 2 рази. Навпаки, приріст дебіту до 1,5 раза був асоційований із практично несприятливим прогнозом: через 3 місяці повне загоєння спостерігалося лише у 3,5% пацієнтів.

$TcPO_2$ доповнює дебітометрію, оскільки відображає не лише магістральний кровотік, а й фактичну тканинну оксигенацію у зоні, наближеній до ранового дефекту. Сучасні дані підтверджують прогностичну цінність $TcPO_2$ для оцінки ймовірності загоєння діабетичних виразок стопи, особливо за умови врахування ангіосомної локалізації вимірювання [13, 14]. Саме тому поєднання $TcPO_2$ із даними дебітометрії та ангіосомної відповідності є більш інформативним, ніж використання кожного з цих критеріїв окремо.

Практичне значення запропонованої моделі полягає в переході від пасивного спостереження за раною до ранньої стратифікації прогнозу. Пацієнти з високою сумою балів можуть продовжувати локальне лікування, некректомії, вакуумну терапію та пластичне закриття дефектів. Пацієнти з низькою сумою балів не повинні тривалий час отримувати малоперспективне і високовартісне місцеве лікування без повторної оцінки судинної тактики. У таких випадках уже протягом першого місяця доцільно розглядати повторну реваскуляризацію, шунтування в артерії гомілково-стопового сегмента або ампутацію на рівні, який забезпечить подальше протезування.

Особливо важливим є акцент на функціональному результаті. Для пацієнта з ішемічною формою синдрому діабетичної стопи клінічний успіх полягає не лише в уникненні високої ампутації, а й у збереженні можливості самостійної ходьби. Тому функціональна спроможність кінцівки має розглядатися як окрема кінцева точка досліджень, присвячених реваскуляризації у пацієнтів із діабетичними ураженнями стопи [6, 7].

Таким чином, отримані результати обґрунтовують необхідність інтегрованого підходу до оцінки реваскуляризації. Ангіосомна концепція визначає анатомічну ціль втручання, дебітометрія – кількісний приріст макрогемодинаміки, а $TcPO_2$ – тканинний результат відновлення кровотоку. Їх поєднання створює підґрунтя для персоналізованого алгоритму лікування пацієнтів з ішемічною формою синдрому діабетичної стопи.

ВИСНОВКИ

Ангіосомно-орієнтована реваскуляризація у пацієнтів з ішемічною формою синдрому діабетичної стопи асоціюється зі зниженням частоти високих ампутацій, вищою ймовірністю збереження функціональної спроможності кінцівки та кращими показниками уникнення ампутації протягом року. Ангіосомна відповідність є важливим, але недостатнім критерієм клінічної ефективності реваскуляризації, оскільки непряма реваскуляризація також покращує загоєння ран.

Інтегрована бальна модель, що поєднує приріст дебіту підколінної артерії, $TcPO_2$ і варіант реваскуляризації за ангіосомною концепцією, може використовуватися для ранньої стратифікації пацієнтів за ймовірністю загоєння рани та вибору подальшої тактики лікування.

Перспективи подальших досліджень. Перспективним є проведення проспективного багатоцентрового дослідження з уніфікованим використанням класифікацій WIfI та GLASS, стандартизованим вимірюванням площі ранового дефекту, динамічним визначенням $TcPO_2$, кількісною оцінкою дебіту підколінної артерії та аналізом довгострокових функціональних результатів.

ДОТРИМАННЯ ЕТИЧНИХ НОРМ

Дослідження виконано відповідно до принципів Гельсінської декларації. Усі клінічні дані були знеособлені перед аналізом.

Обмеження дослідження. Дослідження має ретроспективний характер, що обмежує можливість повного контролю за міжгруповими відмінностями. Клінічні масиви охоплюють різні часові періоди та різні кінцеві точки, тому їх слід розглядати як взаємодоповнювальні, а не як єдину об’єднану базу пацієнтів. Частина висновків щодо прогностичної моделі потребує подальшої перевірки на індивідуальних пацієнтських даних у проспективному дизайні.

Декларація про використання штучного інтелекту. У разі застосування під час підготовки рукопису інструментів штучного інтелекту, вони використовувалися виключно для мовностилістичного редагування, структурування тексту та приведення рукопису до редакційних вимог журналу. Наукова інтерпретація, перевірка фактичних даних, статистичних результатів, висновків і списку літератури залишаються відповідальністю авторів.

ФІНАНСУВАННЯ ТА КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Дослідження виконано як фрагмент комплексних науково-дослідних робіт наукового відділу малоінвазивної хірургії Державної наукової установи «Центр інноваційних технологій охорони здоров’я» Державного управління справами: «Оптимізація підходів до надання спеціалізованої медичної допомоги хірургічним пацієнтам із використанням персоніфікованого анестезіологічного забезпечення» (державний реєстраційний номер 0125U000315; строк виконання: 2025-2029 рр.).

Зовнішнє фінансування для підготовки цієї статті не залучалося.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

ВНЕСОК АВТОРІВ

Гупало Ю. М.[A, E, F]

Шаповалов Д. Ю.[C, D]

Маківчук Д. А.[A, D]

Швед О. Є.[B, E]

Діденко С. М.[B, E]

REFERENCES

1. Fitridge, R., Chuter, V., Mills, J. L., Hinchliffe, R., Azuma, N., Behrendt, C. A., et al. (2024). The intersocietal IWGDF, ESVS, SVS guidelines on peripheral artery disease in people with diabetes and a foot ulcer. Diabetes/Metabolism Research and Reviews, 40, e3686. https://doi.org/10.1002/dmrr.3686
2. Conte, M. S., Bradbury, A. W., Kolh, P., White, J. V., Dick, F., Fitridge, R., et al. (2019). Global vascular guidelines on the management of chronic limb-threatening ischemia. European Journal of Vascular and Endovascular Surgery, 58(1 Suppl.), S1–S109.e33. https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2019.05.006
3. Schaper, N. C., van Netten, J. J., Apelqvist, J., Bus, S. A., Hinchliffe, R. J., & Lipsky, B. A. (2020). IWGDF guidelines on the prevention and management of diabetic foot disease. Diabetes/Metabolism Research and Reviews, 36(Suppl. 1), e3266. https://doi.org/10.1002/dmrr.3266
4. Tanasescu, D., Moisin, A., Fleaca, R., Popa, C., Bacila, C., & Mohor, C. (2022). Modern therapeutic options in diabetic foot ulcer. Journal of Mind and Medical Sciences, 9(2), Article 11. https://doi.org/10.22543/2392-7674.1351
5. Crane, H., Boam, G., Carradice, D., Vanicek, N., Twiddy, M., & Smith, G. E. (2021). Through-knee versus above-knee amputation for vascular and non-vascular major lower limb amputations. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2021(12), CD013839. https://doi.org/10.1002/14651858.CD013839
6. Thorud, J. C., Plemmons, B., Buckley, C. J., Shibuya, N., & Jupiter, D. C. (2016). Mortality after nontraumatic major amputation among patients with diabetes and peripheral vascular disease: A systematic review. Journal of Foot and Ankle Surgery, 55(3), 591-599. https://doi.org/10.1053/j.jfas.2016.01.012
7. Futuyma, Yu. M., Bedeniuk, A. D., & Kulbaba, I. Ya. (2021). Priorytetnist u vybori metodu khirurhichnoi korektsii kuksy pislia amputatsii dystalnoho viddilu stopy u khvorykh iz riznymy formamy syndromu diabetychnoi stopy [Priority in choosing the method of surgical correction of the stump after distal foot amputation in patients with various forms of diabetic foot syndrome]. Shpytalna Khirurhiia. Zhurnal imeni L. Ya. Kovalchuka, 1, 65-71.
8. Adams, G. L., Lichtenberg, M., Wissgott, C., Schmidt, A., Tarra, T., Matricardi, S., & Geraghty, P. J. (2023). Twenty-four month results of Tack-optimized balloon angioplasty using the Tack Endovascular System in below-the-knee arteries. Journal of Endovascular Therapy, 30(3), 393-400. https://doi.org/10.1177/15266028221083462
9. Cai, H., Dong, J., Ye, Y., Song, Q., & Lu, S. (2022). Safety and efficacy of drug-coated balloon in the treatment of below-the-knee artery: A meta-analysis. Journal of Surgical Research, 278, 303-316. https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.04.055
10. Alexandrescu, V. A., Brochier, S., Schoenen, S., Antonelli, E., Azdad, K., Zekhnini, I., & Nodit, M. (2022). Grades of below-the-ankle arterial occlusive disease following the angiosome perfusion: A new morphological assessment and correlations with the inframalleolar GVG stratification in CLTI patients. Annals of Vascular Surgery, 81, 358-377. https://doi.org/10.1016/j.avsg.2021.09.031
11. Huang, T. Y., Huang, T. S., Wang, Y. C., Huang, P. F., Yu, H. C., & Yeh, C. H. (2015). Direct revascularization with the angiosome concept for lower limb ischemia: A systematic review and meta-analysis. Medicine, 94(34), e1427. https://doi.org/10.1097/MD.0000000000001427
12. Jongsma, H., Bekken, J. A., Akkersdijk, G. P., Hoeks, S. E., Verhagen, H. J., & Fioole, B. (2017). Angiosome-directed revascularization in patients with critical limb ischemia. Journal of Vascular Surgery, 65(4), 1208-1219.e1. https://doi.org/10.1016/j.jvs.2016.10.100
13. López-Moral, M., García-Madrid, M., Molines-Barroso, R. J., García-Álvarez, Y., Tardáguila-García, A., & Lázaro-Martínez, J. L. (2023). Analyses of transcutaneous oxygen pressure values stratified for foot angiosomes to predict diabetic foot ulcer healing. Journal of Tissue Viability, 32(4), 480-486. https://doi.org/10.1016/j.jtv.2023.10.003
14. Nam, H., Kim, J., Lee, Y., et al. (2024). The correlation between transcutaneous oxygen pressure and forward-looking infrared thermography in the evaluation of lower extremity perfusion according to angiosome. International Wound Journal, 21, e14431. https://doi.org/10.1111/iwj.14431
15. Didenko, S. M., Hupalo, Yu. M., Subbotin, V. Yu., et al. (2020). Rezultaty khirurhichnoho likuvannia khvorykh iz tsukrovym diabetom ta khronichnoiu krytychnoiu ishemiieiu nyzhnoi kintsivky z urakhuvanniam danykh intraoperatsiinoi debitometrii [Results of surgical treatment of patients with diabetes mellitus and chronic critical lower limb ischemia taking into account intraoperative flowmetry data]. Klinichna Khirurhiia, 87(5-6), 36-40.
16. Hupalo, Yu. M., Shapovalov, D. Yu., Shaprynskyi, V. V., Dzyhal, O. F., Shamrai-Sas, A. V., & Kutsyn, A. M. (2020). Kontseptsiia anhiosom u revaskuliaryzatsii arterii homilky ta stopy u khvorykh na tsukrovyi diabet [The angiosome concept in revascularization of the leg and foot arteries in patients with diabetes mellitus]. Klinichna Khirurhiia, 87(3-4), 55-58. https://doi.org/10.26779/2522-1396.2020.3-4.55

Abstract

ANGIOSOME-TARGETED REVASCULARIZATION AND PERIOPERATIVE ASSESSMENT OF PERFUSION RESERVE IN PATIENTS WITH ISCHEMIC DIABETIC FOOT SYNDROME

Yurii M. Hupalo[1], Danylo Yu. Shapovalov[1], Dmytro A. Makivchuk[1], Olena Ye. Shved[1], Sergii M. Didenko[2]

[1]State Institution of Science «Center of innovative healthcare technologies» State Administrative Department, Kyiv, Ukraine
[2]Clinical Hospital «Feofaniya» of the State Administrative Department, Kyiv, Ukraine

Aim. To substantiate the clinical feasibility of an integrated approach to the selection and evaluation of revascularization effectiveness in patients with ischemic diabetic foot syndrome based on the angiosome concept, intraoperative flowmetry, and transcutaneous oxygen pressure measurement in foot tissues.

Materials and methods. A retrospective analytical review of two complementary clinical datasets was performed. The first dataset included 98 revascularizations of 77 lower limbs in 74 patients with ischemic diabetic foot syndrome treated in 2014-2019, with procedures classified as direct or indirect according to the angiosome concept. The second dataset included 137 patients with type 2 diabetes mellitus, ischemic diabetic foot syndrome, stenotic-occlusive lesions of the tibial arterial segment, and ischemic foot necrosis treated in 2014-2022. All patients underwent balloon angioplasty with intraoperative measurement of popliteal artery flow, $TcPO_2$ assessment, and evaluation of the revascularization type according to the angiosome concept.

Results. In the direct angiosome-targeted revascularization group, wound healing within 6 months was achieved in 81.7% of cases, compared with 78.6% in the indirect revascularization group. The rate of major amputation was lower after direct revascularization: 12.4% versus 36.8%. Major amputation avoidance within one year was 87.6% and 66.7%, respectively, while functional limb capacity was preserved in 79.3% and 57.9% of patients. In the second dataset, the increase in popliteal artery flow after balloon angioplasty was clearly associated with foot wound healing: when flow increased up to 1.5-fold, complete healing at 3 months was observed in 3.5% of patients; when flow increased 1.5-2-fold – in 50.0%; and when flow increased more than 2-fold – in 82.8%. An integrated score including flow increase, $TcPO_2$, and angiosome-based revascularization type enabled patient stratification by wound-healing probability and the need for modification of treatment strategy.

Conclusions. Angiosome-targeted revascularization is a clinically significant factor in reducing the risk of major amputation and preserving functional limb capacity in patients with ischemic diabetic foot syndrome. To predict wound healing, it is advisable to assess not only anatomical correspondence between the revascularized artery and the wound area, but also objective indicators of perfusion reserve, including popliteal artery flow increase and $TcPO_2$.

Keywords: **diabetic foot syndrome, chronic limb-threatening ischemia, angiosome, revascularization, balloon angioplasty, intraoperative flowmetry, $TcPO_2$, wound healing, amputation**

Received: 20.04.2026
Accepted: 15.06.2026
Published: 13.08.2026