

# ЭВОЛЮЦИЯ ОСТЕОСИНТЕЗА ДИСТАЛЬНОГО МЕТАЭПИФИЗА ЛУЧЕВОЙ КОСТИ

Максимов Б.И.\*

ГБУЗ «Городская клиническая больница №29  
им. Н.Э. Баумана», Москва

DOI: 10.25881/20728255\_2022\_17\_4\_2\_106

**Резюме.** Актуальность выбора оптимального способа хирургического лечения пациентов с переломами дистального метаэпифиза лучевой кости (ДМЭЛК) обусловлена значительной частотой и распространенностью этой травмы, отсутствием единой тактической системы лечения таких повреждений, а также небольшим количеством неудовлетворительных результатов остеосинтеза. Пройдя достаточно долгий путь развития, остеосинтез ДМЭЛК и сегодня вызывает повышенный интерес, направленный, прежде всего, на способы повышения эффективности и безопасности лечения пациентов с переломами ДМЭЛК. С этой целью проведен анализ отечественной и зарубежной литературы, посвященной хирургическому лечению пациентов с переломами ДМЭЛК и его эволюции, выявлен спектр возможных вариантов остеосинтеза, а также оценены перспективы применения того или иного способа лечения.

**Ключевые слова:** дистальный метаэпифиз лучевой кости, спицевой остеосинтез, тыльная пластина, волярная пластина с угловой стабильностью, пронатор-сберегающий доступ, мининвазивный ладонный хирургический доступ.

## Введение

Перелом дистального метаэпифиза лучевой кости (ДМЭЛК) является одним из наиболее часто встречаемых повреждений в клинической практике травматологов-ортопедов, достигая по данным литературы четверти из общей структуры всех травм, влекущих за собой обращения за первичной медицинской помощью [1–3]. При этом около двух третей этих переломов сопровождается смещением отломков и требует их репозиции [4]. Вопросы оптимизации оказания медицинской помощи пациентам с переломами ДМЭЛК по-прежнему не утратили своей актуальности и продолжают активно обсуждаться специалистами в области травматологии и кистевой хирургии [5; 6]. И если консенсус относительно вида медицинской помощи большинством специалистов найден: в последние два десятилетия отмечается значительный рост частоты хирургического лечения переломов ДМЭЛК, то объемы оперативного вмешательства и способы фиксации переломов продолжают дискутироваться [1–3; 5; 7]. Стоит заметить, что не только точность репозиции костных отломков, хотя, безусловно, она и первостепенна, но и их последующая фиксация должны рассматриваться как основополагающие этапы современного лечения переломов ДМЭЛК, так как и само повреждение, и его лечение, могут напрямую влиять на функционирование лучезапястного сустава и кисти, а некорректное лечение и неправильное сращение перелома могут заканчиваться даже инвалидностью пациента [8]. Именно неудовлетворительные результаты консервативного лечения в гипсовой повязке, предшествовавшего хирургической

## THE EVOLUTION OF OSTEOSYNTHESIS OF DISTAL RADIUS FRACTURES: SYSTEMATIC REVIEW

Maximov B.I.\*

Moscow City Hospital №29 named after N.E. Bauman, Moscow

**Abstract.** The relevance of the choice of optimal surgical treatment of patients with distal radius fractures is associated with significant frequency and prevalence of such an injury, the lack of unified tactical system of treatment and the great number of unsatisfactory results of osteosynthesis. Having passed a long path of evolution, osteosynthesis of distal radius even now causes an increased interest aimed primarily at the ways to improve the effectiveness and safety of treatment of patients with distal radius fractures. Toward this end, an analysis of domestic and foreign literatures that deals surgical treatment of patients with distal radius fractures and its evolution was undertaken, range of possible options of osteosynthesis has been identified, as well as application prospects for a particular method were assessed.

**Keywords:** distal radius, K-wire osteosynthesis, dorsal plate, volar locking plate, pronator-sparing approach, minimally invasive volar approach.

эре лечения переломов ДМЭЛК — резидуальные боли, деформация нижней трети предплечья, несращение переломов и даже инвалидность — заставили пересмотреть методы лечения данных повреждений. Поспособствовало этому и развитие остеосинтеза, как способа хирургической фиксации переломов костей [9]. С этого момента начинается бурный рост применения различных методик внутренней фиксации переломов ДМЭЛК и прежде всего перкутанной фиксации при помощи спиц Киршнера, как наиболее простой и малозатратной [10].

## Спицевой остеосинтез

Рассматривая историю внутренней фиксации переломов ДМЭЛК, стоит заметить, что спицевой остеосинтез был первой попыткой фиксации этих переломов. При этом спицы обеспечивали и репозицию, и удержание репонированных отломков кости для их последующей консолидации в корректном положении. Одним из первых решений этой задачи в лечении переломов ДМЭЛК был метод фиксации отломков при помощи спиц Киршнера. Так, в 1908 г. Lambotte впервые описывает экстрафокальную спицевую фиксацию переломов ДМЭЛК, основным принципом которой была фиксация перелома посредством чрескожного введения спиц из дистального отломка в проксимальный. Данная методика обеспечивала большую стабильность костных отломков по сравнению с удержанием их в гипсовой повязке, однако, не создавала должной жесткости фиксации, заканчиваясь, порой, вторичным смещением, что послужило поводом к дальнейшим поискам более надежного способа удержа-

\* e-mail: dr.borismaximov@gmail.com

ния отломков. И в 1976 г. А. Karandji впервые описывал интрафокальный способ фиксации двумя спицами, обозначая основные его преимущества перед предшествующей техникой экстрафокального спицевого остеосинтеза: простота выполнения, жесткость фиксации, обеспечивающая срастание перелома в корректном положении и предотвращающая вторичное смещение отломков, а также отсутствие необходимости в дополнительной внешней иммобилизации, позволяющее максимально быстро приступить к функциональной реабилитации. Стоит заметить, что изначально данная методика была предложена и введена в практическое применение для лечения низкоэнергетических, внесуставных переломов ДМЭЛК с тыльным смещением отломков. Оригинальная техника интрафокального остеосинтеза спицами подразумевала первичное выполнение закрытой ручной репозиции для восстановления длины, оси и ротации поврежденного сегмента с последующим введением спицы непосредственно в линию перелома в области шиловидного отростка лучевой кости, по направлению от ее лучевого края к локтевому, обеспечивающим эффект подпорки для дистального отломка и восстановление инклинации лучевой кости. Аналогичным образом выполнялось заведение спицы и через линию перелома с тыльной стороны лучевой кости по направлению к ладонному кортикальному слою, обеспечивающее удержание восстановленной ладонной инклинации лучевой кости. Послеоперационный период подразумевал отсутствие внешней иммобилизации и незамедлительную мобилизацию кисти и лучезапястного сустава. Оригинальная техника, предложенная А. Karandji, получила широкую популярность в Европе, о чем свидетельствуют публикации того времени. Последовавшие за этим многочисленные научные труды значительно расширили показания как к применению спицевого остеосинтеза ДМЭЛК, так и к дополнительной иммобилизации перелома в послеоперационном периоде, причем без потери в удовлетворенности пациентами результатами лечения [10].

Что же касается результатов применения данных методик, то одно из первых сообщений было опубликовано J. Eriette с соавт. на примере лечения 72 пациентов с внесуставными переломами ДМЭЛК: применяли двухспицевую технику Karandji без гипсовой иммобилизации в послеоперационном периоде. У 26% прооперированных пациентов наблюдались различные осложнения (вторичное смещение отломков, повреждения сухожилий, отеки и болевой синдром). Тем не менее, лишь у 7% из них итоговый неудовлетворительный результат был связан с этими осложнениями. 93% прооперированных пациентов не имели болевых ощущений по результатам лечения, у 80% полностью восстановилась сила схвата кисти и около 84% пациентов имели хорошие и отличные итоговые функциональные результаты. Авторы впервые публикуют показания к применению спицевого остеосинтеза ДМЭЛК у пожилых пациентов и у пациентов с внутрисуставными типами переломов [11].

Изучив результаты лечения 159 пациентов с внесуставными переломами ДМЭЛК путем интрафокального спицевого остеосинтеза, L. Reuoux с соавт. сообщили об осложнениях, возникших в процессе этого лечения. Авторы описывают вторичное смещение отломков, миграцию спиц, инфекционные осложнения в области стояния спиц, повреждения чувствительной ветви лучевого нерва и сухожилий. Тем не менее, в 91% результаты лечения были расценены как хорошие и отличные, в 93% случаев был достигнут хороший и отличный объем движений в лучезапястном суставе и у 73% — хорошие и отличные рентгенологические результаты остеосинтеза [10].

По мере расширения показаний к хирургическому лечению переломов ДМЭЛК происходит и некоторое модифицирование предложенного метода. Появляются сообщения о лечении пациентов с переломами ДМЭЛК путем интрафокального остеосинтеза спицами, дополненного использованием третьей спицы, заводимой по медиальному краю тыльной поверхности лучевой кости. Показанием к применению этой третьей спицы хирурги считали наличие фрагментации тыльного кортикального слоя лучевой кости [12].

В опубликованном в 1987 г. А. Karandji обзоре результатов 10-летнего применения оригинальной техники, закрепляется правомочность использования третьей задне-медиальной спицы для оскольчатых переломов ДМЭЛК, в том числе и с внутрисуставным компонентом. В это же время появляются и сообщения об успешном применении метода Karandji не только для переломов с тыльным смещением, но и об эффективности ее при смещении в ладонную сторону [10]. T. Fritz с соавт. впервые декларируют концепцию комбинированного экстра- и интрафокального спицевого остеосинтеза: при этом репозиция перелома достигается и удерживается за счет классического метода Karandji с дополнительной аугментацией перелома 1–2 спицами: в 85% были получены отличные и хорошие результаты лечения, в 10% — удовлетворительные и в 5% — неудовлетворительные. Осложнения были получены в 23% случаев, наиболее частым из них была парестезия в результате повреждения чувствительной ветви лучевого нерва [13].

P. Strohm с соавт. в своем рандомизированном исследовании сравнили результаты применения традиционного экстрафокального и комбинированного остеосинтеза, описанного T. Fritz, на примере 100 пациентов с внесуставными переломами ДМЭЛК: у пациентов с комбинированным экстра-интрафокальным остеосинтезом результаты лечения были значимо лучше [10].

H. Handol с соавт. на основе анализа базы Cochrane сообщают, что несмотря на существование доказательств эффективности применения спицевого метода фиксации переломов ДМЭЛК, отсутствуют конкретные рекомендации относительно вида спицевой фиксации, а также показания к их использованию. При этом интрафокальный спицевой остеосинтез сопровождается большим риском осложнений, таких как потеря первичной репозиции, по-

вреждения сухожилий и чувствительной ветви лучевого нерва и даже может осложняться развитием синдрома рефлекторной симпатической дистрофии [14].

К.А. Егиазарян с соавт., изучив результаты применения спицевого остеосинтеза ДМЭЛК в клинической практике, сообщают, что использование экстра- или интрафокального остеосинтеза спицами, а также их комбинация демонстрирует хорошие и отличные функциональные результаты при определенных типах переломов. Неудовлетворительные результаты, полученные в процессе лечения пациентов с переломами ДМЭЛК путем спицевой фиксации, авторы в большей степени относят к недооценке морфологии перелома и некорректному выбору типа фиксации. Тем не менее, отмечается применимость методики и при внутрисуставных, многооскольчатых переломах ДМЭЛК, обязательным условием, однако, авторы считают репонированность перелома и возможность удержания этой репозиции на время заведения спиц. Нерепонированные закрытым способом комплексные внутрисуставные переломы не подлежат применению спицевого остеосинтеза, требуя открытой репозиции и внутренней фиксации погружными имплантатами. Значительным плюсом является и то, что удаление спиц не требует повторной госпитализации и наркоза и может выполняться в амбулаторных условиях, что на фоне тенденции к росту хирургической помощи пациентам с переломами ДМЭЛК, несет и экономические преимущества, способствуя возрастанию интереса к спицевому остеосинтезу [10].

Подводя итог в оценке спицевого остеосинтеза ДМЭЛК, хочется отметить его бесспорные преимущества: меньшую длительность и травматичность операции, меньшую требовательность к травматологу с точки зрения его технических возможностей и хирургического опыта, меньшую себестоимость в сравнении с использованием внутренней фиксации. Тем не менее, спицевой остеосинтез не всегда может обеспечить приемлемую жесткость фиксации, приводя в некоторых случаях к вторичному смещению, особенно при комплексных и внутрисуставных переломах, что и послужило поводом к поискам более надежного способа удержания отломков [9; 10].

### Накостный остеосинтез тыльными пластинами

С дальнейшим развитием технологий лечения переломов и появлением в арсенале травматологов-ортопедов пластин, основная цель накостной хирургической фиксации ДМЭЛК стала состоять в том, чтобы стабилизировать костные отломки в корректном положении относительно друг друга до полной консолидации, восстановив утраченную анатомию, а также обеспечить максимально раннюю возможность движений в лучезапястном суставе и пальцах кисти, избегнув внешней иммобилизации. Еще совсем недавно общепризнанным методом внутренней фиксации переломов ДМЭЛК со смещением отломков считали остеосинтез тыльными пластинами, позволяющий добиваться значительной механической

стабильности [15; 16]. Преимуществами тыльных хирургических доступов и сопутствующей им фиксации тыльными пластинами традиционно считались прямая визуализация и контроль репозиции внутрисуставных переломов ДМЭЛК, а также более надежная поддержка и защита костных отломков от тыльного коллапса, нередко возникающего после выполнения остеосинтеза и старта реабилитационных мероприятий.

D. Osada с соавт. публикуют результаты лечения 41 пациента с внутрисуставными переломами ДМЭЛК с применением тыльных пластин. Средний период наблюдения после остеосинтеза составил 15 месяцев. Были получены следующие ранние рентгенологические результаты остеосинтеза (средние): высота лучевой кости — 11 мм, инклинация лучевой кости — 23 градуса, ладонный наклон суставной фасетки лучевой кости — 7 градусов, локтевой вариант — 1,5 мм, остаточная внутрисуставная ступень — 0,3 мм. По шкале Gartland & Werley результаты лечения 36 пациентов расценены как отличные, 5 — как хорошие. Тем не менее, у 18 пациентов в процессе наблюдения отмечена потеря репозиции и ухудшение рентгенологических параметров, достигнутых изначально [17]. J. Boretto с соавт., проанализировав результаты лечения 679 пациентов с переломами ДМЭЛК, приходят к заключению о возможности рассматривать остеосинтез тыльными пластинами как абсолютную необходимость при определенных типах переломов, а именно: переломы со смещением центрально расположенного фрагмента суставной поверхности лучевой кости; переломы, линия которых располагается менее чем в 1 см от дистального края ладонной поверхности лучевой кости; смещенные переломы, вовлекающие тыльный фрагмент срединной колонны; переломы типа «тыльный Бартон»; их всевозможные комбинации [16]. Подобного же мнения придерживаются и J. Lee с соавт. [18].

Несмотря на все преимущества, достигаемые подобным способом фиксации перелома, близость расположения сухожилий разгибателей кисти и пальцев к устанавливаемой пластине зачастую вызывала конфликт между ними, проявляющийся ирритативным синдромом со стороны сухожилий, а в некоторых случаях заканчивался спонтанным разрывом последних в отдаленном периоде [19]. Таким образом, достигнутые успехи в остеосинтезе переломов ДМЭЛК (прежде всего в достигаемой стабильности фиксации), были омрачены значительным количеством получаемых осложнений [20]. Тем не менее, с улучшением дизайна и появлением новых низкопрофильных и более анатомичных тыльных пластин можно надеяться и на уменьшение частоты развития подобных осложнений и их использование по-прежнему может быть показано в таких ситуациях, как: фрагментация тыльного кортикального слоя ДМЭЛК; комплексные многооскольчатые переломы, требующие комбинированных хирургических доступов и фиксации; сопутствующие переломы костей запястья, требующие выполнения тыльного доступа к ним [21].

Интересные данные сообщают N. Devaux с соавт.: для минимизации рисков развития осложнений стоит использовать современные низкопрофильные тыльные пластины и обязательно укрывать устанавливаемый фиксатор лоскутом, выкраиваемым из удерживателя разгибателей [22].

Одним из вариантов тыльной фиксации переломов ДМЭЛК является использование тыльного мостовидного дистракционного остеосинтеза [15; 23; 24], позволяющее стабилизировать многооскольчатые внутрисуставные переломы и крайне низкие переломы, по-прежнему представляющие серьезные трудности для современной травматологии. В данном случае пластина играет роль не только стабилизатора перелома (за счет тыльной поддержки), но и его репозирующего инструмента, позволяющего вытягивать отломки за счет лигаментотаксиса. По данным R. Perlus применение тыльного мостовидного дистракционного остеосинтеза для лечения оскольчатых внутрисуставных переломов ДМЭЛК демонстрирует отличные результаты с низким процентом осложнений. Однако, необходимость удаления данных фиксаторов видится авторам их недостатком [23].

B. Sharareh с соавт., проанализировав результаты лечения 24 пациентов с внутрисуставными оскольчатыми переломами ДМЭЛК, которым выполняли дистракционный остеосинтез тыльными пластинами, пришли к заключению об эффективности методики с точки зрения консолидации переломов, тем не менее отметив при этом довольно значительный процент неудовлетворительных рентгенологических результатов в плане восстановления нормальной рентгенанатомии [24]. Справедливости ради, хотелось бы отметить, что применение дистракционного остеосинтеза тыльными пластинами, как и использование аппаратов внешней фиксации в лечении пациентов с переломами ДМЭЛК, как правило, носит казуистический характер, применяясь лишь у определенной категории пациентов и по определенным показаниям [25].

### Накостный остеосинтез ладонными пластинами

С началом XXI века и появлением волярных пластин для фиксации переломов ДМЭЛК, применение последних получает лавинообразную популярность у практикующих хирургов [1–3; 5; 8]. Последующие доработки дизайна фиксаторов, создание более современных пластин с угловой стабильностью, реализовалось в появлении металлоконструкций, обеспечивающих возможность жесткой стабильной фиксации переломов ДМЭЛК с ладонной стороны лучевой кости, исключающей при этом прямой контакт между сухожилиями и имплантатами. Это явилось поистине революционным прорывом в хирургическом лечении переломов ДМЭЛК, поскольку помимо надежной фиксации (даже в условиях остеопороза), открывало двери для ранней мобилизации поврежденной конечности и смежных суставов [6; 8; 26]. Получившая широкое распространение в последнее время методика

открытой репозиции и внутренней фиксации переломов ДМЭЛК с применением волярных анатомически предызогнутых пластин с угловой стабильностью позволила значительно увеличить возможности хирургов и расширить показания к подобному рода операциям, приведя к значительному сокращению сроков реабилитации [27]. Не стоит отрицать, однако, что использование подобного рода фиксаторов требует тщательного предоперационного планирования и строгого соблюдения хирургической техники [28]. Кроме того, данные операции выполняются через хирургический доступ протяженностью до 8–10 см по ладонной поверхности нижней трети предплечья. И если разрез непосредственно кожи, за исключением косметического результата, вряд ли может вызывать споры в плане потенциальной вредности, то последующие действия хирурга на подлежащих мягких тканях, прежде всего — мышцах, могут оказывать существенное влияние на результат хирургического вмешательства [29]. Тем не менее, накостный остеосинтез с применением волярных пластин с угловой стабильностью является современным трендом и «золотым стандартом» в лечении пациентов с переломами ДМЭЛК, прекрасно зарекомендовавшим себя за последние два десятилетия как с точки зрения стабильности фиксации перелома, так и достигаемых рентгенологических и функциональных результатов [30].

Несмотря на то, что такой подход в настоящее время является самым часто применяемым методом внутренней фиксации переломов ДМЭЛК, он не лишен и ряда потенциальных недостатков, в большинстве своем связанных с возможностью развития конфликта между сухожилиями сгибательной поверхности предплечья с устанавливаемым имплантом [31].

### Накостный остеосинтез ладонными пластинами с применением пронатор-сберегающей техники

Именно это побудило хирургов к дальнейшему поиску способов усовершенствования хирургической техники накостного остеосинтеза пластинами для исключения подобного рода осложнений, что было реализовано в возможности сохранения квадратного пронатора предплечья на этапе хирургического доступа, при этом установка пластины под мышцей исключала контакт сухожилий сгибателей с металлоконструкцией [32; 33]. Еще одним фактором, способствовавшим расширению показаний к применению «пронатор-сберегающего» подхода в хирургическом лечении пациентов с переломами ДМЭЛК, по мнению ряда авторов, является невозможность, в подавляющем большинстве случаев, полноценной рефиксации мышцы после ее отсечения для визуализации перелома и прямой репозиции при использовании традиционной техники [5; 34].

Причиной этому могут быть значительное повреждение мышечной ткани в момент травмы и несостоятельность мышечных швов ввиду их прорезывания, что приводит к недопокрытию импланта и его прямому контакту-конфликту с вышележащими сухожилиями перед-

ней поверхности предплечья [5]. Кроме того, J. Imatani с соавт. отмечают, что послеоперационная рубцовая ткань в области хирургического вмешательства и квадратного пронатора может приводить к хроническому болевому синдрому и ограничению функциональных возможностей предплечья, прежде всего — ротации [34], а по данным В. Hohendorff с соавт., сохранение квадратного пронатора предплечья в процессе остеосинтеза ДМЭЛК снижает интра- и послеоперационную кровопотерю [35].

Ряд авторов вообще ставит под сомнение необходимость реальной прямой репозиции переломов ДМЭЛК, большинство из которых прекрасно поддается закрытой ручной репозиции и не требует, таким образом, отсечения квадратного пронатора предплечья в процессе остеосинтеза [32; 34], подчеркивая при этом важную роль квадратного пронатора в питании дистального отдела лучевой кости, активной стабилизации дистального лучелоктевого сустава, а также пронационной силы предплечья [34; 36]. М. Armangil с соавт. сообщают, что отсечение квадратного пронатора для визуализации перелома приводит к потере до 20% пронационной силы предплечья, несмотря на его последующую рефиксацию [37].

К. Moens с соавт., проведя сравнительный анализ результатов применения традиционного и пронатор-сберегающего доступов, сообщают о преимуществах последнего по части раннего восстановления пронационной силы предплечья (выше на треть по сравнению с пациентами, которым выполняли отсечение квадратного пронатора на этапе хирургического доступа), а также отмечают значительно меньшую выраженность послеоперационного отека конечности [38].

Н. Lo с соавт. на основании результатов своего анатомического исследования приводят довольно интересные данные о том, что линия перелома ДМЭЛК, как правило, находится дистальнее линии квадратного пронатора предплечья (у 52 изученных пациентов среднее расстояние между дистальным краем квадратного пронатора и суставной поверхностью полулунной ямки составило 16,2 мм (от 12 до 19 мм), среднее расстояние между дистальным краем квадратного пронатора и суставной поверхностью ладьевидной ямки составило 17,6 мм (от 11 до 21 мм)); в то же время, среднее расстояние между суставной поверхностью полулунной ямки и линией перелома было 12,2 мм (от 7,3 до 17 мм), тогда как среднее расстояние между суставной поверхностью ладьевидной ямки и линией перелома — 13,2 мм (от 9,4 до 18,8 мм) [39]. Это позволяет считать, по мнению авторов, пронатор-сберегающий доступ применимым в большинстве случаев без каких-либо технических трудностей для репозиции перелома.

Н. Takada с соавт. по результатам своего кадаверного исследования заключают об отсутствии необходимости отсечения квадратного пронатора предплечья для заведения пластины и винтов. Применение тракции по отношению к пронатору в проксимальном направлении и

его субмышечная мобилизация позволяют устанавливать и пластину, и дистальные винты, тогда как межмышечная диссекция в проксимальной части квадратного пронатора предплечья позволяет устанавливать проксимальные диафизарные винты без нарушения целостности самой мышцы [40].

С.К. Googens с соавт. в своей работе проанализировали результаты лечения 128 пациентов с переломами ДМЭЛК: 62 выполняли остеосинтез с сохранением квадратного пронатора, а 68 — традиционным ладонным доступом. Пациенты были сопоставимы по всем иным параметрам изучения. Результаты были оценены через год после операции: объем движений был схож в обеих группах, за исключением сгибания/разгибания в лучезапястном суставе (был значительно лучше в группе с сохранением квадратного пронатора). Результаты по QuickDASH были значительно ниже также в группе пациентов, перенесших остеосинтез с сохранением квадратного пронатора. Оценка по ВАШ была значительно ниже у этих же пациентов, однако, только в первые 6 недель после операции. Относительно силы хвата кисти и общей удовлетворенности пациентов проведенным лечением различий между группами достоверно не наблюдали. Авторы приходят к заключению о возможности применения пронатор-сберегающей техники для лечения пациентов с переломами ДМЭЛК, позволяющей достигать значительно более высоких функциональных результатов [41].

Именно понимание вышеизложенного заставляет многих хирургов задумываться о необходимости, по возможности, сохранения квадратного пронатора во время выполнения наkostного остеосинтеза переломов дистального метаэпифиза лучевой кости и использовать пронатор-сберегающую технику [32; 36; 42; 43].

### **Миниинвазивный наkostный остеосинтез ладонными пластинами**

В последние годы в литературе появляется все больше информации об успешном внедрении в клиническую практику миниинвазивного хирургического доступа при наkostном остеосинтезе переломов ДМЭЛК [34; 44–47], первые упоминания о применении которого относятся к 2000–2001 гг. [48]. При этом основными преимуществами такого подхода считаются: отсутствие дополнительной девитализации костной ткани и сохранение межотломковой гематомы, благоприятно влияющее на процесс консолидации перелома; снижение кровопотери; снижение риска инфекционных осложнений открытой репозиции; уменьшение рубцового процесса в зоне вмешательства (и обусловленной этим тугоподвижности); меньший риск развития конфликта «имплантат-сухожилие» со стороны сгибателей кисти и пальцев за счет сохранения интерпозиции квадратного пронатора между ними, а также, что немаловажно, большее удовлетворение пациентов эстетическими результатами хирургического вмешательства [29; 32; 34; 40; 49; 50].

В современной литературе описывается несколько вариантов миниинвазивных ладонных хирургических доступов, отличающихся геометрией расположения и размером кожных разрезов [45–47], однако несущих в себе одну принципиально общую черту — сохранение целостности квадратного пронатора предплечья. Такой подход находит все большее количество сторонников [5; 32; 34; 44–46], демонстрируя при этом отличные функциональные и эстетические результаты [29; 49; 50]. Так, Xu-Ming Wei с соавт. в своей работе сообщают о безопасности и эффективности выполнения миниинвазивного на костного остеосинтеза волярными пластинами с угловой стабильностью, отмечая при этом сопоставимость рентгенологических результатов лечения при сравнении с традиционным остеосинтезом, выполняемым через стандартные ладонные доступы и превосходство методики по части раннего функционального и эстетического результатов [51]. Схожие данные представлены и в независимых работах Б.И. Максимова и Y. Zenke с соавт., а также многих других [29; 44; 52–54].

Не обесценивая отмеченных преимуществ использования миниинвазивного хирургического доступа, авторы отмечают и его недостатки. Это, прежде всего, отсутствие прямой визуализации места перелома и контроля репозиции, что обязывает хирурга быть опытным в вопросах непрямой репозиции и интерпретации интраоперационных рентгенограмм, поскольку не косметический результат и сохранение квадратного пронатора, а достижение анатомичной репозиции является первоочередной задачей выполняемого остеосинтеза. К тому же отсутствие прямого контроля прилагаемой дистракции в зоне перелома может приводить к фиксации отломков ДМЭЛК в перерастянутом положении, что, несмотря на малотравматичность самой операции, может являться причиной несращения перелома и образования ложного сустава [55]. Кроме того, поперечный кожный разрез в области проксимальной ладонной складки несет в себе и риск повреждения ладонной ветви срединного нерва, берущей свое начало от магистрального ствола именно в этой области [56]. S. McKay с соавт. сообщают, что частота подобного осложнения может достигать 17% [57]. Y. Chiu с соавт. сообщают о возможности прижатия пластиной сухожилия длинного сгибателя большого пальца при использовании миниинвазивного доступа с последующими функциональными проблемами, могущими требовать повторных хирургических вмешательств [58].

P. Laverneaux с соавт. особенно подчеркивают, что при возникновении технических трудностей во время операции, подобный доступ не имеет возможности к расширению, что следует учитывать на этапе предоперационного планирования [50].

Тем не менее, на сегодняшний день в мировой травматологической практике для лечения пациентов с переломами ДМЭЛК использование миниинвазивного остеосинтеза приобретает все большую популярность [29; 53; 54; 59–61].

## Заключение

Остеосинтез ДМЭЛК по праву можно считать приоритетным способом лечения пациентов с подобными травмами. Полученные в результате отбора и предметного анализа литературы данные красноречиво свидетельствуют о вариативности существующих способов фиксации костных отломков и их эволюции, как в историческом, так и технологическом плане. На сегодняшний день ни один из способов остеосинтеза ДМЭЛК не утратил своей актуальности и продолжает применяться в клинической практике. Тем не менее, отсутствие однозначных показаний к разным способам остеосинтеза и большая вариативность результатов их применения подчеркивает необходимость дальнейшего совершенствования лечебных концепций. Очевидно одно, независимо от применяемого способа фиксации ДМЭЛК, приоритетной задачей остеосинтеза должна оставаться максимально анатомичная репозиция и надежная стабилизация костных отломков на весь период консолидации, выполненные максимально щадящее по отношению и к пациенту, и к конечности.

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов (The author declare no conflict of interest).**

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Vaghela KR, Velazquez-Pimentel D, Ahluwalia AK, Choraria A, Hunter A. Distal radius fractures: an evidence-based approach to assessment and management. *Br J Hosp Med (Lond)*. 2020; 81(6): 1-8. doi: 10.12968/hmed.2020.0006.
- Gou Q, Xiong X, Cao D, He Y, Li X. Volar locking plate versus external fixation for unstable distal radius fractures: a systematic review and meta-analysis based on randomized controlled trials. *BMC MusculoskeletDisord*. 2021; 22(1): 433. doi: 10.1186/s12891-021-04312-7.
- Поликарпов А.В., Кашанский Ю.Б., Кондратьев И.П., Цапенко В.О. Результаты хирургического лечения нестабильных переломов костей дистального отдела предплечья в метаэпифизарной зоне // Кафедра травматологии и ортопедии. — 2021. — №4(46). — С.13-16. [Polikarpov AE, Kashansky YB, Kondratev IP, Tsapenko VO. Results of surgical treatment of unstable fractures of the distal forearm in the metaepiphyseal zone. Department of Traumatology and Orthopedics. 2021; 4(46): 13-16. (In Russ.)] doi:10.17238/2226-2016-2021-4-13-16.
- Kaya O, Gulabi D, Buyukdogan H, Baris AC, Kilic B, Caliskan M. Clinical results of distal radius intraarticular comminuted fractures in the elderly: a retrospective comparative analysis of different fixation methods. *Cureus*. 2022; 14(8): e28077. doi: 10.7759/cureus.28077.
- Максимов Б.И., Пандунц А.А., Ведерников Н.Н. Возможности сохранения квадратного пронатора предплечья при хирургическом лечении переломов дистального отдела лучевой кости // Вестник национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова. — 2018. — Т.13. — №4. — С.49-52. [Maksimov BI, Pandunc AA, Vedernikov NN. Opportunities of preservation of the forearm pronator with the surgical treatment of fractures of the distal radius bone. Bulletin of the National Medical and Surgical Center named after N.I. Pirogov. 2018; 13(4): 49-52. (In Russ.)] doi: 10.25881/BPNMSC.2018.22.37.008.
- Benjamin MM, Swigler CW. Evidence-Based Review of Distal Radius Fractures. *Orthop Clin North Am*. 2018; 49(2): 211-222. doi: 10.1016/j.jocl.2017.12.001.
- Rupp M, Cambon-Binder A, Alt V, Feron JM. Is percutaneous pinning an outdated technique for distal radius fractures? *Injury*. 2019; 50: 30-35. doi: 10.1016/j.injury.2019.03.048.
- Хоминцев В.В., Ткаченко М.В., Сырцов В.В., Иванов В.С. Сравнительный анализ способов лечения больных с переломами дистального метаэпифиза лучевой кости // Травматология и ортопедия России.

- 2015. — №2. — С.5-15. [Khomnets VV, Tkachenko MV, Syrtsov VV, Ivanov VS. Comparative analysis of treatment technique in patients with distal radius fractures. *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2015; (2): 5-15. (In Russ.)] doi: 10.21823/2311-2905-2015-0-2-5-15.
9. Хоминец В.В., Ткаченко М.В., Иванов В.С., Жогина М.А., Лисин С.В., Мышкин И.А. Современные тенденции в диагностике и хирургическом лечении переломов дистального метаэпифиза лучевой кости (научный обзор) // Профилактическая и клиническая медицина. — 2020. — №2. — С.33-44. [Khomnets VV, Tkachenko MV, Ivanov VS, Zhogina MA, Lisin SV, Myshkin IA. Current tendencies in diagnostics and surgical treatment of distal radius fractures (review). *Preventive and clinical medicine*. 2020; 2: 33-44. (In Russ.)]
  10. Егизарян К.А., Максимов Б.И., Аскеров А.А., Ведерников Н.Н., Матвиенко М.И. Спицевой остеосинтез переломов дистального метаэпифиза лучевой кости. // Кафедра травматологии и ортопедии. — 2021. — №3-(45). — С.61-70. [Egizaryan K.A., Maximov B.I., Askerov A.A., Vedernikov N.N., Matvienko M.I. K-wire osteosynthesis of distal radius fractures. *Department of Traumatology and Orthopedics*. 2021; 3(45): 61-70. (In Russ.)] doi: 10.17238/issn2226-2016.2021.3.62-71.
  11. Epinette JA, Lehut JM, Cavenaille M, Bouretz JC, Decouls J. Pouteau-Colles fracture: double-closed "basket-like" pinning according to Kapandji. Apropos of a homogeneous series of 70 cases. *Ann Chir Main*. 1982; 1(1): 71-83. doi: 10.1016/s0753-9053(82)80047-1.
  12. Hoel G, Kapandji A. Osteosynthesis using intra-focal pins of anteriorly dislocated fractures of the inferior radial epiphysis. *Ann Chir Main Memb Super*. 1995; 14(3): 142-56. doi: 10.1016/s0753-9053(05)80312-6.
  13. Fritz T, Werschling D, Klavara R, Kriegelstein C, Friedl W. Combined Kirschner wire fixation in the treatment of Colles fracture. A prospective, controlled trial. *Arch Orthop Trauma Surg*. 1999; 119(3-4): 171-8. doi: 10.1007/s004020050384.
  14. Handoll HH, Vaghela MV, Madhok R. Percutaneous pinning for treating distal radial fractures in adults. *Cochrane Database Syst Rev*. 2007; 3: CD006080. doi: 10.1002/14651858.CD006080.pub2.
  15. Mohamed MA, Abdel-Wanis ME, Said E, Abdel-Aziz IA, Ahmed AM, Addosooki A. Dorsal bridge plating versus bridging external fixation for management of complex distal radius fractures. *Injury*. 2022 Oct; 53(10): 3344-3351. doi: 10.1016/j.injury.2022.08.010.
  16. Boretto JG, Altube G, Petrucelli E, Zaidenberg EE, Gallucci GL, De Carli P. Dorsal Plating for Specific Fracture Pattern of the Distal Radius. *J Hand Surg Asian Pac Vol*. 2021; 26(4): 502-512. doi: 10.1142/S2424835521500466.
  17. Osada D, Tamai K, Iwamoto A, Fujita S, Saotome K. Dorsal plating for comminuted intra-articular fractures of the distal end of the radius. *Hand Surg*. 2004; 9(2): 181-90. doi: 10.1142/s0218810404002194.
  18. Lee JH, Ahn JT, Baek JH. Dorsal plating versus volar plating with limited dorsal open reduction in the management of AO type C3 distal radius fractures with impacted articular fragments: A retrospective comparative study. *Acta OrthopTraumatol Turc*. 2022; 56(1): 42-47. doi: 10.5152/j.aott.2022.21157.
  19. Matzon JL, Kenniston J, Beredjikian PK. Hardware-related complications after dorsal plating for displaced distal radius fractures. *Orthopedics*. 2014; 37(11): e978-82. doi: 10.3928/01477447-20141023-54.
  20. Rozental TD, Beredjikian PK, Bozentka DJ. Functional outcome and complications following two types of dorsal plating for unstable fractures of the distal part of the radius. *J Bone Joint Surg Am*. 2003; 85(10): 1956-60. doi:10.2106/00004623-200310000-00014.
  21. Ghafoor H, Haefeli M, Steiger R, Honigmann P. Dorsal Plate Osteosynthesis in Simple and Complex Fractures of the Distal Radius: A Radiological Analysis of 166 Cases. *J Wrist Surg*. 2021; 11(2): 134-144. doi: 10.1055/s-0041-1735839.
  22. Devaux N, Henning J, Haefeli M, Honigmann P. The Retinaculum Flap for Dorsal Fixation of Distal Radius Fractures. *J Hand Surg Am*. 2018; 43(4): 391.e1-391.e7. doi: 10.1016/j.jhsa.2018.01.011.
  23. Perlus R, Doyon J, Henry P. The use of dorsal distraction plating for severely comminuted distal radius fractures: A review and comparison to volar plate fixation. *Injury*. 2019; 50(1): S50-S55. doi: 10.1016/j.injury.2019.03.052.
  24. Sharareh B, Mitchell S. Radiographic Outcomes of Dorsal Spanning Plate for Treatment of Comminuted Distal Radius Fractures in Non-Elderly Patients. *J Hand Surg Glob Online*. 2019; 2(2): 94-101. doi: 10.1016/j.jhsg.2019.10.001.
  25. Labrum JT 4th, Ilyas AM. Bridge plate fixation of distal radius fractures: indications, techniques and outcomes. *Orthopedics*. 2021; 44(4): e620-e625. doi:10.3928/01477447-20210618-26.
  26. Saving J, Enocson A, Ponzer S, Mellstrand Navarro C. External fixation versus volar locking plate for unstable dorsally displaced distal radius fractures—a 3-year follow-up of a randomized controlled study. *J Hand Surg Am*. 2019; 44(1): 18-26. doi: 10.1016/j.jhsa.2018.09.015.
  27. Максимов Б.И. Накостный остеосинтез переломов дистального метаэпифиза лучевой кости с использованием волярного хирургического доступа // Вестник национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова. — 2018. — Т.13. — №2. — С.78-83. [Maksimov BI. Extramedullary osteosynthesis of fractures of distal metacarpophysis of radius bone with the use of volar surgical access. *Bulletin of the National Medical and Surgical Center named after N.I. Pirogov*. 2018; 13(2): 78-83. (In Russ.)] doi: 10.25881/BPNMSC.2018.22.37.008.
  28. Lu CK, Liu WC, Chang CC, Shih CL, Fu YC, Jupiter JB. A systematic review and meta-analysis of the pronator quadratus repair following volar plating of distal radius fractures. *J Orthop Surg Res*. 2020; 15(1): 419. doi:10.1186/s13018-020-01942-w.
  29. Максимов Б.И. Минимально инвазивный наkostный остеосинтез дистального метаэпифиза лучевой кости: есть ли преимущества перед стандартной техникой? // Травматология и ортопедия России. — 2020. — №1. — С.76-84. doi: 10.21823/2311-2905-2020-26-1-76-84. [Maksimov BI. Minimally invasive plate osteosynthesis for distal radius fractures: are there any advantages against conventional technique? *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2020; (1): 76-84. (In Russ.)]
  30. Youlden DJ, Sundaraj K, Smithers C. Volar locking plating versus percutaneous Kirschner wires for distal radius fractures in an adult population: a meta-analysis. *ANZ J Surg*. 2019; 89(7-8): 821-826. doi: 10.1111/ans.14903.
  31. Lee DS, Weikert DR. Complications of distal radius fixation. *Orthop Clin North Am*. 2016; (47): 415-424. doi: 10.1016/j.oct.2015.09.014.
  32. Sen MK, Strauss N, Harvey EJ. Minimally invasive plate osteosynthesis of distal radius fractures using a pronator sparing approach. *Tech Hand Up Extrem Surg*. 2008; (12): 2-6. doi: 10.1097/BTH.0b013e3180cac281.
  33. Lee DY, Park YJ, Park JS. A meta-analysis of studies of volar locking plate fixation of distal radius fractures: conventional versus minimally invasive plate osteosynthesis. *Clin Orthop Surg*. 2019; 11(2): 208-219. doi: 10.4055/cios.2019.11.2.208.
  34. Imatani J, Noda T, Morito Y, Sato T, Hashizume H, Inoue H. Minimally invasive plate osteosynthesis for comminuted fractures of the metaphysis of the radius. *J Hand Surg Br*. 2005; 30(2): 220-225. doi: 10.1016/j.jhsb.2004.12.009.
  35. Hohendorf B, Unglaub F, Spies CK, Müller LP, Ries C. Refixierung des musculus pronator quadratus mit einem Teil des M.-brachioradialis-Ansatzes bei der palmaren Plattenosteosynthese einer distalen Radiusfraktur. *Oper Orthop und Traumatol*. 2020; 32(1): 82-86. doi: 10.1007/s00064-019-0601-0.
  36. Mulders M, Walenkamp M, Bos F, Schep N, Goslings C. Repair of the pronator quadratus after volar plate fixation in distal radius fractures: a systematic review. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2017; 12(3): 181-188. doi: 10.1007/s11751-017-0288-4.
  37. Armangil M, Bezirgan U, Basarir K, Bilen G, Demirtas M, Bilgin SS. The pronator quadratus muscle after plating of distal radius fractures: is the muscle still working? *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2014; 24(3): 335-339. doi: 10.1007/s00590-013-1193-2.
  38. Moens K, Vansintjan P, De Loore G, De Vos J. Pronator sparing plate osteosynthesis in distal radius fractures: early functional outcome. *Acta Orthop Belg*. 2018; 84(4): 531-538.
  39. Lo HY, Cheng HY. Clinical study of the Pronator Quadratus muscle: anatomical features and feasibility of Pronator-Sparing Surgery. *BMC Musculoskeletal Disord*. 2014; 5: 136. doi:10.1186/1471-2474-15-136.
  40. Takada N, Otsuka T. Anatomical features of the pronator quadratus muscle related to minimally invasive plate osteosynthesis of distal radial fractures with a volar locking plate: a cadaver study. *Eur Orthop Traumatol* 2011, 2:133-136.
  41. Goorens CK, Debaenst N, Van Royen K, Provyn S, Goubau JF. Minimally Invasive Pronator Quadratus Sparing Approach versus Extended Flexor Carpi Radialis Approach with Pronator Quadratus Repair for Volar Plating in Distal Radial Fractures. *J Wrist Surg*. 2021 Jul 5; 11(1): 41-47. doi: 10.1055/s-0041-1731329.

42. Liu X, Ye H, Shi J. Effectiveness of pronator quadratus muscle sparing in volar plate fixation for unstable distal radius fracture in adults. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*. 2020; 34(7): 814-819. doi: 10.7507/1002-1892.201911089.
43. Huang X, Jia Q, Li H, Kerem E, Peng C, Kong W, Tusunnizayi M, Hamiti Y, Feng D, Zhao Y. Evaluation of sparing the pronator quadratus for volar plating of distal radius fractures: a retrospective clinical study. *BMC Musculoskelet Disord*. 2022; 23(1): 625. doi: 10.1186/s12891-022-05576-3.
44. Zenke Y, Sakai A, Oshige T, Moritani S, Fuse Y, Maehara T, Nakamura T. Clinical results of volar locking plate for distal radius fractures: conventional versus minimally invasive plate osteosynthesis. *J Orthop Trauma*. 2011; 25(7): 425-431. doi: 10.1097/bot.0b013e3182008c83.
45. Chen CY, Lin KC, Yang SW, Renn JH, Tarng YW. Clinical results of using minimally invasive long plate osteosynthesis versus conventional approach for extensive comminuted metadiaphyseal fractures of the radius. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2015; 135(3): 361-367. doi: 10.1007/s00402-015-2162-5.
46. Lebaillly F, Zemirline A, Facca S, Gouzou S, Liverneaux P. Distal radius fixation through a mini-invasive approach of 15 mm. Part 1: a series of 144 cases. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2014; 24(6): 877-890. doi: 10.1007/s00590-013-1363-2.
47. Максимов Б.И., Артемьев А.А. Малоинвазивный накостный остеосинтез дистального метаэпифиза лучевой кости: показания к применению и особенности методики // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. 2017; 20(2): 61-66. [Maximov BI, Artemiev AA. Minimally invasive plate osteosynthesis of distal radius fractures: indications for use and features of the method. *Issues of Reconstructive and Plastic Surgery*. 2017; 20(2): 61-66. (In Russ.)] doi: 10.17223/1814147/60/07.
48. Duncan SF, Weiland AJ. Minimally invasive reduction and osteosynthesis of articular fractures of the distal radius. *Injury*. 2001; 32(1): SA14-24. doi:10.1016/s0020-1383(01)00057-2.
49. Galmiche C, Rodríguez GG, Xavier F, Igeta Y, Hidalgo Diaz JJ, Liverneaux P. Minimally invasive plate osteosynthesis for extra-articular distal radius fracture in postmenopausal women: longitudinal versus transverse incision. *J Wrist Surg*. 2019; 8(01): 18-23. doi:10.1055/s-0038-1667305.
50. Liverneaux P, Ichihara S, Facca S, Hidalgo Diaz JJ. Outcomes of minimally invasive plate osteosynthesis (MIPO) with volar locking plates in distal radius fractures: A review. *Hand Surg Rehabil*. 2016; 35S: S80-S85. doi:10.1016/j.hansur.2016.02.011.
51. Wei XM, Sun ZZ, Rui YJ, Song XJ. Minimally invasive plate osteosynthesis for distal radius fractures. *Indian J Orthop*. 2014; 48(1): 20-24. doi:10.4103/0019-5413.125483.
52. Pire E, Hidalgo Diaz JJ, Salazar Botero S, Facca S, Liverneaux PA. Long volar plating for metadiaphyseal fractures of distal radius: study comparing minimally invasive plate osteosynthesis versus conventional approach. *J Wrist Surg*. 2017; 6(03): 227-234. doi: 10.1055/s-0037-1599791.
53. Zhang X, Huang X, Shao X, Zhu H, Sun J, Wang X. A comparison of minimally invasive approach vs conventional approach for volar plating of distal radial fractures. *Acta Orthop Traumatol Turc*. 2017 Mar; 51(2): 110-117. doi:10.1016/j.aott.2017.02.013.
54. Lee DY, Park YJ, Park JS. A Meta-analysis of studies of volar locking plate fixation of distal radius fractures: conventional versus minimally invasive plate osteosynthesis. *Clin Orthop Surg*. 2019; 11(2): 208-219. doi:10.4055/cios.2019.11.2.208.
55. Максимов Б.И. Ложный сустав дистального метаэпифиза лучевой кости после миниинвазивного накостного остеосинтеза // Вестник национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова. — 2019. — Т.14. — №3. — С.152-155. [Maksimov BI. Nearthrosis of the distal metaepiphysis of the radius after minimally invasive bone osteosynthesis. *Bulletin of the National Medical and Surgical Center named after N.I. Pirogov*. 2019; 14(3): 152-155. (In Russ.)] doi: 10.25881/BPNMSC.2018.22.37.008.
56. Smith JL, Ebraheim NA. Anatomy of the palmar cutaneous branch of the median nerve: a review. *J Orthop*. 2019; 16(6): 576-579. doi: 10.1016/j.jor.2019.06.010.
57. McKay SD, MacDermid JC, Roth JH, Richards RS. Assessment of complications of distal radius fractures and development of a complication checklist. *J Hand Surg*. 2001; 26(5): 916-922. doi:10.1053/jhsu.2001.26662.
58. Chiu YC, Kao FC, Tu YK. Flexor pollicis longus tendon entrapment after performing minimally invasive plate osteosynthesis of a distal radius fracture: a case report. *Hand Surg*. 2013; 18(3): 403-6. doi: 10.1142/S0218810413720246.
59. Ribeiro E, Campanholi G, Acherboim M, Ruggiero GM. Mini-Invasive Surgery for Distal Radius Fractures: A Double Incision under 12mm. *J Wrist Surg*. 2021; 10(2): 136-143. doi:10.1055/s-0040-1721141.
60. Asmar G, Bellity J, Falcone MO. Surgical comfort and clinical outcomes of MIPO with an extra-short plate designed for distal radius fractures. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2021; 31(3): 481-490. doi: 10.1007/s00590-020-02791-3.
61. Neubauer T, Plecko M, Grechenig S, Hartmann A, Ortmaier R, Hitzl W, Feigl G. Minimal invasive plating of distal radius fractures. A safe procedure? *Ann Anat*. 2019; 224: 172-178. doi: 10.1016/j.aanat.2019.05.001.