

ISSN 2782-3806

ISSN 2782-3814 (Online)

УДК 616-001.4:616-073.756.8:616-001

МИННО-ВЗРЫВНЫЕ РАНЕНИЯ: РЕНТГЕНОЛОГИЧЕСКАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНЕЧНОСТЕЙ

Климович А. М.¹, Фрумен А. Г.², Береговский Д. А.¹, Ефимцев А. Ю.¹,
Труфанов Г. Е.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

² Федеральное государственное казенное учреждение здравоохранения «Главный военный клинический госпиталь войск национальной гвардии Российской Федерации», Балашиха, Россия

Контактная информация:

Климович Анастасия Михайловна,
ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова»
Минздрава России,
ул. Аккуратова, д. 2, Санкт-Петербург,
Россия, 197341.
E-mail: vargina.anast@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 07.04.2025
и принята к печати 31.05.2025

РЕЗЮМЕ

К числу наиболее тяжелых видов боевой травмы и травм мирного времени относятся минно-взрывные повреждения. В большинстве случаев основными локализациями повреждений являются ранения конечностей.

В данной статье рассматриваются актуальные подходы к визуализации минно-взрывных ранений конечностей, диагностические возможности и особенности применения в клинической практике.

Ключевые слова: компьютерная томографическая ангиография, компьютерная томография, лучевая диагностика, минно-взрывные ранения, травматология

Для цитирования: Климович А.М., Фрумен А.Г., Береговский Д.А. и др. Минно-взрывные ранения: рентгенологическая и компьютерная томографическая диагностика повреждений конечностей. Российский журнал персонализированной медицины. 2025;5(3):230-250. DOI: 10.18705/2782-3806-2025-5-3-230-250. EDN: QSMYNR

MINE BLAST INJURIES: X-RAY AND COMPUTED TOMOGRAPHIC DIAGNOSTICS OF LIMB INJURIES

Klimovich A. M.¹, Frumen A. G.², Beregovskii D. A.¹, Efimtsev A. Yu.¹,
Trufanov G. E.¹

¹ Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia

² Main Military Clinical Hospital of the Troops of the National Guard of the Russian Federation, Balashikha, Russia

Corresponding author:

Klimovich Anastasiya M.,
Almazov National Medical Research Centre,
Akkuratova str., 2, Saint Petersburg,
Russia, 197341.
E-mail: vargina.anast@yandex.ru

Received 07 April 2025; accepted 31 May 2025

ABSTRACT

Mine blast injuries are among the most severe types of combat and peacetime injuries. In most cases, the main localizations of damage are limb wounds.

This article discusses current approaches to visualization of mine blast injuries of the limbs, diagnostic capabilities and features of application in clinical practice.

Key words: computed tomography, computed tomography angiography, mine blast injuries, radiology, traumatology

For citation: Klimovich AM, Frumen AG, Beregovskii DA, et al. Mine blast injuries: X-ray and computed tomographic diagnostics of limb injuries. Russian Journal for Personalized Medicine. 2025;5(3):230-250. (In Russ.) DOI: 10.18705/2782-3806-2025-5-3-230-250. EDN: QSMYNR

АКТУАЛЬНОСТЬ

По статистике на ранения конечностей приходится от 50 % до 75 % всех повреждений у пациентов, поступающих в медицинские учреждения в условиях вооруженных конфликтов. Травмы нижних конечностей фиксируются чаще, чем верхних, в среднем в соотношении 1,5:1–2:1. Данное соотношение способно достигать 4:1 при активном использовании противопехотных фугасных мин [1].

Ранения магистральных сосудов встречаются в 6–17 % травм военного времени. Ранения артерий и вен конечностей встречаются в 45 % всех сосудистых повреждений [2].

Повреждения нижней конечности часто встречаются при высокоэнергетических травмах и, как правило, сопровождаются открытыми переломами с большими дефектами костей и повреждениями мягких тканей [3].

Связано это с минно-взрывным характером повреждений [4].

В этих случаях решающее значение имеют различные методы рентгенологической оценки, такие как традиционная рентгенография, компьютерная томография и компьютерная томографическая ангиография. Эти методы могут быть необходимы в экстренных случаях, для оценки осложнений, предоперационного планирования и принятия решений при реконструкции костей [3].

МИННО-ВЗРЫВНЫЕ ПОРАЖЕНИЯ: ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Детонация взрывчатого вещества представляет собой быстрый экзотермический химический процесс, в ходе которого боевой заряд преобразуется в газы под высоким давлением. Данное превращение осуществляется за крайне короткое время, исчисляемое микросекундами [1].

Центр детонации немедленно окружает зона бризантного воздействия, приводящая к разрушению твердых объектов [4]. Следом возникает область фугасного эффекта, где происходит выброс окружающих материалов: твердых предметов, оболочек снарядов и готовых поражающих элементов. Взрывные устройства сообщают осколкам скорости, превышающие 1000 м/с; их поражающая способность остается значительной на удалении от эпицентра. При отсутствии металлической оболочки у заряда, расширяющиеся газы уносят частицы поверхностного слоя ВВ, догорающие в полете с образованием яркого пламени [4].

Дальнейшее стремительное расширение продуктов детонации вытесняет окружающий воздух, формируя сжатый слой. Этот плотный слой движется сферически (или полусферически) от источника как воздушная ударная волна (ВУВ) [4].

Передняя граница сжатия, именуемая фронтом ударной волны, характеризуется экстремально высокими значениями избыточного давления. Распространяясь сверхзвуково, ВУВ последовательно проходит фазы: сжатия (положительное давление), разрежения (отрицательное давление) и взрывной волны (рис. 1) [4].

Кривая Фридлендера графически отображает зависимость избыточного давления от времени во фронте взрывной волны, распространяющейся в открытом пространстве без преград. Интегральное значение импульса на единицу площади эквивалентно площади, ограниченной данной кривой [1].

Пик высокого давления, распространяющийся со сверхзвуковой скоростью (3000–9000 м/с) в течение миллисекунд и быстро затухающий с расстоянием, представляет собой волну повышенного давления. Ее передняя граница (фронт ударной волны) производит дробящее воздействие на биологические ткани (бризантный эффект). В эпицентре взрыва возможно полное разрушение тканей,

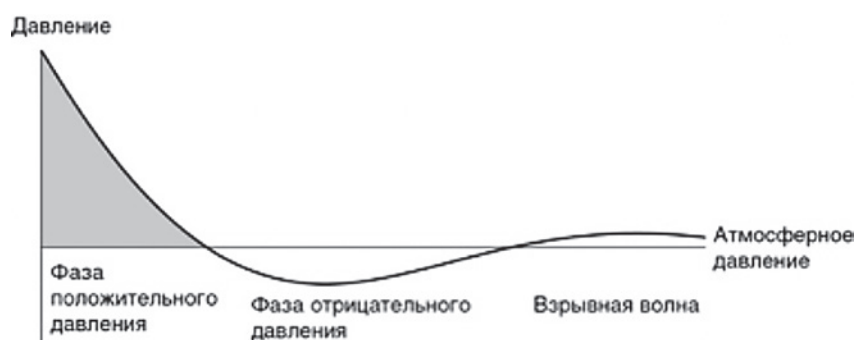


Рис. 1. Схема изменения давления при взрыве (кривая Фридлендера) [4]

Figure 1. Diagram of pressure change during explosion (Friedlander curve) [4]

тогда как на периферии наблюдаются травматические ампутации конечностей, обширное повреждение тканей [4].

Волна отрицательного давления — это область разрежения, относительный вакуум [1].

Перепад давления этой волны значительно меньше, но длительность ее в 3–10 раз больше волны повышенного давления, что также сопровождается выделением разрушительной энергии [4].

Взрывная волна — это поток быстро расширяющихся газов (со скоростью до 100 м/с) значительно меньшей амплитуды, но большей продолжительности, чем две первые волны. Динамическое избыточное давление ВУВ отбрасывает окружающие предметы с постепенно уменьшающейся энергией [4].

При взрывах в присутствии препятствий характер распространения ВУВ усложняется за счет турбулентности, могут образовываться газовые струи избыточного давления. Взрыв в замкнутом объеме (помещении) приводит к многократному отражению волн давления от ограждающих поверхностей, что усиливает их поражающее действие [4].

Ведущее поражающее воздействие ВУВ определяется скоростью достижения пика избыточного давления и величиной импульса [4].

Характер распространения взрывной волны усложняется присутствием препятствий. Подобно звуковым волнам, ударная волна обтекает встречные препятствия, воздействуя на укрывшихся людей со всех направлений. Перпендикулярное взаимодействие с преградой генерирует значительно более высокое давление по сравнению с косым воздействием. При этом нормально падающая волна сжимается и отражается от поверхности, что вызывает интерференцию и образование области экстремально повышенного давления. Именно каскадные отражения волн в замкнутых помещениях ответственны за резко возрастающие показатели избыточного давления и удлинение импульсной характеристики (рис. 2) [1].

МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ МИННО-ВЗРЫВНЫХ ПОРАЖЕНИЯХ

Взрывные многофакторные поражения относят к боевой хирургической травме [4].

Выделяют четыре категории повреждений, вызванных взрывом:

1. Баротравмы как первичные повреждения взрывного генеза возникают при прямом воздействии фаз положительного и отрицательного дав-

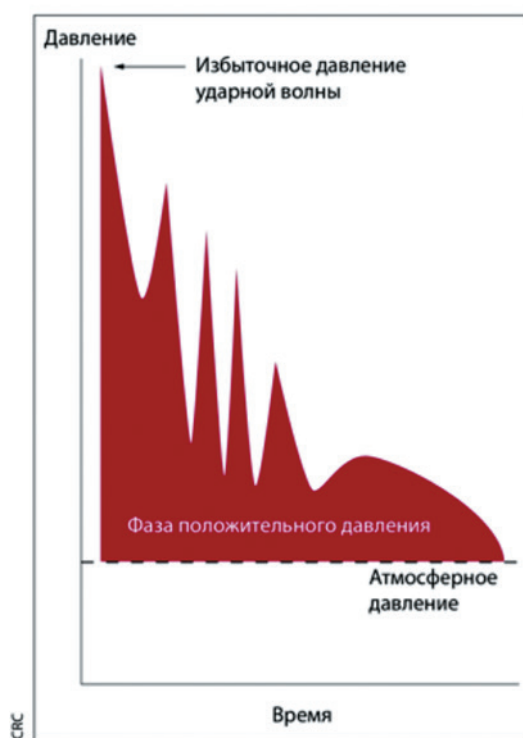


Рис. 2. Типовая картина соотношения «давление-время» при взрыве в закрытом пространстве [1]

Figure 2. Typical picture of the pressure-time ratio during an explosion in an enclosed space [1]

Таблица 1. Общая классификация боевой хирургической травмы [5]

Table 1. General classification of combat surgical injury [5]

Этиология		Характер раневого канала	Отношение к полостям	Локализация	Наличие повреждений органов и тканей
Ранения	Огнестрельные: - пулевые; - осколочные; - минно-взрывные.	- Слепые; - Сквозные; - Касательные.	- Непроникающие; - Проникающие.	Голова	С повреждением: головного мозга, глаз, ушей, челюстно-лицевой области. С переломами: костей черепа, костей челюстно-лицевой области.
	Неогнестрельные: - колото-резаные - колотые - рубленые и др.				
Травмы, в том числе взрывные			Закрытые травмы. Открытые травмы.	Шея	С повреждением: глотки, гортани, трахеи, пищевода, кровеносных сосудов.
				Грудь	С переломами: ребер, грудины, лопатки, ключицы. С повреждением: легких, сердца, пищевода, кровеносных сосудов.
				Живот	С повреждением: паренхиматозных органов, полых органов, кровеносных сосудов, неорганических образований.
				Таз	С переломами: тазовых костей, крестца, копчика. С повреждением: мочевого пузыря, уретры, прямой кишки, кровеносных сосудов, половых органов.
				Позвоночник	С переломами: тел, дужек, отростков позвонков. С повреждением: спинного мозга, его корешков.
				Конечности	С переломами костей. С повреждением: суставов, кровеносных сосудов, нервных стволов, с обширным повреждением мягких тканей, с отслойкой мягких тканей. С разрушением, отрывом (полным и неполным).

ления ударной волны. Контакт пикового избыточного давления с организмом индуцирует два типа энергетических волн: компрессионную и сдвиговую [1].

Продольное распространение волны сжатия через биологические ткани сопровождается частичным отражением энергии на границах разнородных

сред. Остаточная энергия формирует значительные перепады давления, наиболее выраженные на интерфейсах:

- газообразные/плотные ткани (орган слуха);
- газообразные/жидкие среды (полые органы);
- жидкие/упругие структуры (сосудистая сеть) [1].

Критическая уязвимость характерна для границы «газ-жидкость». Фаза высокого давления вызывает мгновенное сжатие газа в замкнутых полостях. Последующий переход к фазе разрежения провоцирует детонационное расширение воздуха, разрывающее окружающие ткани. Это приводит к отслоению тканей — эффекту, аналогичному образованию пузырьков при кипении воды [1].

Волны сдвига движутся поперечно относительно границ сред, подобно силам инерции при ДТП. Соприкасающиеся ткани разной плотности приобретают различные ускорения или замедления, порождая сдвигающее усилие. Это усилие превышает естественную эластичность тканей, вызывая разрывы и нарушение целостности связок [1].

Дробящее воздействие взрыва является причиной переломов трубчатых костей, а фугасная волна осуществляет тотальный отрыв мягкотканых структур. Наиболее тяжелым последствием для пострадавших в эпицентральной зоне выступает ампутационное повреждение, преимущественно локализованное в проксимальном отделе большеберцовой кости. Дополнительно регистрируются случаи торакоабдоминальной эвентрации. Характерны обширные повреждения мышц [1].

2. Вторичные взрывные поражения в форме осколочных ранений формируются из двух категорий поражающих элементов: первичных (фрагменты оболочки боеприпаса или его внутреннего содержимого) и вторичных (детритус окружающей

среды, приведенный в движение ударной волной, включая стеклянные осколки, древесную щепу, частицы грунта и каменные фрагменты) [1].

Осколочные повреждения в эпицентральной зоне характеризуются повышенной тяжестью: феномен временной пульсирующей каверны, типичный для огнестрельных ранений, потенцируется импульсом фугасной волны и отсроченным тромбообразованием в периферическом сосудистом русле [1].

3. Третичные взрывные поражения обусловлены кинетическим воздействием ударной волны, способной катапультировать пострадавших с последующей травматизацией о твердые объекты или провоцировать баллистическое перемещение массивных предметов. Совокупное бризантное и фугасное воздействие индуцирует разрушение строительных конструкций, ведущее к компрессионным синдромам, краш-повреждениям тканей, черепно-мозговым травмам, асфиксии механического генеза и спинальным повреждениям [1].

4. Четвертичные взрывные поражения и сопутствующие повреждения: термодинамическая сфера взрыва достигает температур порядка 3000 °C, вызывая глубокие термические ожоги. Кумулятивный эффект ударной волны и ожогового поражения > 30 % телесной поверхности обладает прогностически летальным исходом [1]. Продукты детонации содержат токсичные компоненты (включая монооксид углерода), индуцирующие асфиксические состояния. Ингаляционное поступление аэро-



Рис. 3. На рентгеновском снимке видны осколки стекла в тканях [1]

Figure 3. The X-ray image shows glass fragments in the tissues [1]

зольных загрязнителей (пылевые частицы, дымовые взвеси) дополнительно провоцирует респираторную недостаточность [1].

Вариантом взрывных поражений являются минно-взрывные ранения — специфический результат контактного воздействия взрыва фугасных минных боеприпасов нажимного действия [4].

Отличительной чертой минно-взрывного ранения является травматическая ампутация или массивное разрушение сегмента конечности, непосредственно контактировавшего со взрывным устройством, а также повреждение и загрязнение тканей вышележащих областей, множественные осколочные ранения и термические ожоги [4].

Пиковое избыточное давление ударной волны компремирует и разрушает стопу, наступившую на мину. Генерируемые волны компрессии распространяются аксиально по костным структурам, сосудистым магистралям и мягкотканым слоям на всем протяжении конечности. Данные волновые процессы инициируют костные дезинтеграции, тогда как сопутствующая фугасная волна индуцирует ротационную деформацию тканей в зоне перелома с последующей диссоциацией стопы [4].

Параллельно возникает кинетический феномен мышечного смещения в проксимально-латеральном направлении («эффект зонтика»). Сфокусированный детонационный фронт отделяет периостальную оболочку с прикрепленными

мышечными массивами от костного остатка — реализуя фазу «раскрытия» зонтика. Последующая репозиция тканей соответствует фазе «закрытия». Поверхностные мышечные пласты (*m. gastrocnemius*) подвергаются дистальному смещению с меньшим повреждением по сравнению с глубокими антеро-латеральными слоями и *m. soleus* (рис. 6.1–5) [4].

Баротравматические поражения внутренних органов, аналогичные первичному ударному воздействию, преимущественно проявляются контузиями миокарда и паренхимы легких, а также гематомами брыжеечного корня. Тяжесть данных повреждений коррелирует с интенсивностью детонационного импульса. Отдельную категорию составляют церебральные контузионные очаги, развивающиеся по идентичному механизму [4].

При МВР верхних конечностей (при постановке мины или разминировании, взрыве в руках запала или мины-ловушки) часто одновременно возникает множественное поражение головы с повреждением глаз, ЧЛЮ и ЛОР-органов [4].

При МВР пиковая энергетическая нагрузка фокусируется на дистальном опорном комплексе конечности с последующим экспоненциальным затуханием в проксимальном направлении. Детонационное избыточное давление индуцирует тотальную дезинтеграцию и диссоциацию стопы. Инфильтрация пирокинетических газов и ударной волны в подкожные пространства и раневые каналы

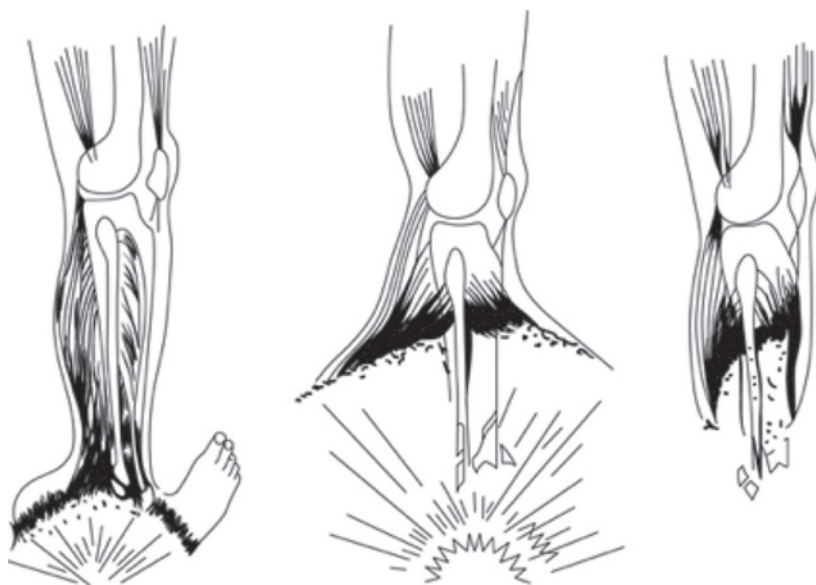


Рис. 4. Схема механогенеза формирования минно-взрывной раны при подрыве на противопехотной mine [4]

Figure 4. Scheme of mechanogenesis of the formation of a mine-explosive wound during an antipersonnel mine explosion [4]

сегмента голени вызывает экстензивное отслоение мягкотканых структур от остеального каркаса [4].

Термодинамическая сфера раскаленных газов и детонационная волна распространяются радиально-сферически, что детерминирует формирование травматических и коагуляционных некрозов в проекции костных выступов голени и мягкотканых структур на уровне ампутации, а также специфическую пространственную дисперсию поражающих элементов [4]. Конусообразная траектория осколочных фрагментов генерирует характерную топографию поражений: раневые каналы в контралатеральной конечности, перинеальной области, ягодичных массивах, антеролатеральной поверхности торса, верхних конечностях, краниофаци-

альной зоне. Данная конфигурация коррелирует с биомеханической позой ходьбы при антефлексии туловища [4].

КЛАССИФИКАЦИЯ БОЕВЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНЕЧНОСТИ

1. Огнестрельные повреждения мягких тканей конечностей составляют 47–62 % в структуре санитарных потерь, причем по характеру морфологических изменений выделяют точечные и ограниченные раневые дефекты, обширные утраты мягкотканых структур, а также травмы с сопутствующим нарушением целостности сосудисто-нервных образований и сухожильного аппарата.



Рис. 5. Схема взрывной травмы конечности [4]

Figure 5. Scheme of explosive limb injury [4]

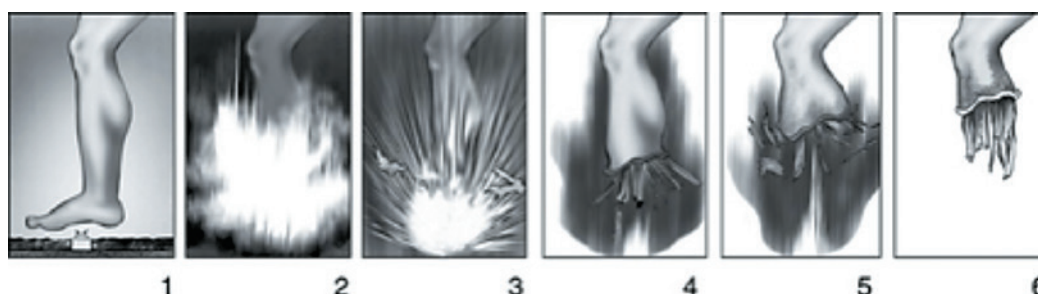


Рис. 6. Схема, иллюстрирующая механизм разрушения дистальных отделов нижней конечности при минно-взрывном ранении (1–6) [4]

Figure 6. Diagram illustrating the mechanism of destruction of the distal parts of the lower limb in case of mine-explosion injury (1–6) [4]

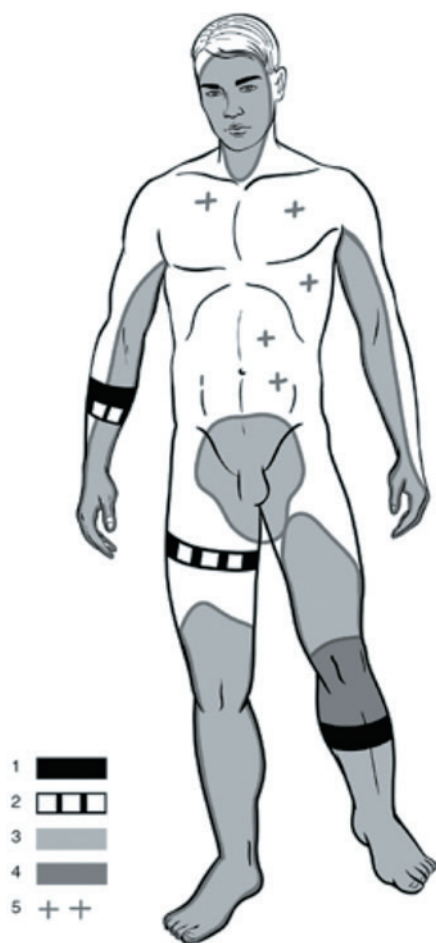


Рис. 7. Типовые паттерны повреждения анатомических структур при МБР

Топография ампутационных линий:

- 1 — линия отрывов конечностей;**
- 2 — локализация переломов трубчатых костей;**
- 3 — распределение множественных осколочных ранений мягких тканей;**
- 4 — зоны деструкции мягкотканых комплексов при травматических ампутациях;**
- 5 — проникающие повреждения торакоабдоминальной полости [4].**

Figure 7. Typical patterns of damage to anatomical structures in MBR

Topography of amputation lines:

- 1 — line of limb detachments;**
- 2 — localization of fractures of tubular bones;**
- 3 — distribution of multiple soft tissue shrapnel wounds;**
- 4 — areas of destruction of soft tissue complexes during traumatic amputations;**
- 5 — penetrating injuries of the thoracoabdominal cavity [4].**

2. Огнестрельные костные деструкции занимают 35–38 % в структуре боевых повреждений опорно-двигательной системы, демонстрируя специфику патомеханики при диафизарных и метафизарных поражениях: разрушение кортикального слоя характеризуется макрооскольчатыми переломами с сагиттальным растрескиванием, коммунитивными повреждениями с суставной экстензией линий излома, а также микрооскольчатыми дефектами с первичной костной утратой. Пулевое воздействие на губчатые кости сопровождается преимущественно перфорационными переломами и макрооскольчатыми внутрисуставными деструкциями, тогда как высокоскоростные осколочные ранения индуцируют формирование первичных дефектов костной ткани с выраженным компрессионным компонентом [4].

Классификация огнестрельных переломов конечностей предусматривает дифференциацию по следующим критериям: количественный параметр (одиночные, множественные или сочетанные повреждения); тип ранящего агента (пулевые либо осколочные воздействия); морфология раневого канала (сквозные, слепые или касательные дефекты); характер костной деструкции (преимущественно оскольчатые формы, включая коммунитивные варианты с первичным костным дефицитом, перфорационные и краевые изломы, тогда как поперечные, косые, винтообразные и продольные встречаются реже); топография поражения (кости тазового пояса, ключицы, лопатки, плечевая, бедренная, элементы голени, предплечья, стопы или кисти); уровень перелома (проксимальная, медиальная или дистальная треть диафиза); сопутствующие повреждения мягкотканых структур (от ограниченных ран до экстензивных дефектов, соответствующих типам II–IV по Gustilo-Andersen, 1990), а также нейрососудистых пучков — тип IIIС по классификации Gustilo и Andersen, без повреждения; степень шока (I, II, III, терминальное состояние). Для классификации повреждений тканей при переломах, помимо критериев Gustilo и Andersen, используют 4-степенную классификацию Tschernie (1982) [4].

3. Огнестрельные повреждения крупных артикулярных структур составляют 17–18,2 % в структуре ОР конечностей, дифференцируясь по следующим критериям: морфология мягкотканых поражений (ограниченные/экстензивные); тип повреждающего агента (пулевые/осколочные); конфигурация раневого канала (сквозные/слепые/касательные); топография (плечевой, локтевой, кистевой, тазобедренный, коленный, голеностопный суставы); инвазивность относительно суставной полости (проникающие/

непроникающие); степень костной деструкции (наличие/отсутствие интраартикулярного перелома); масштаб повреждения артикулярных поверхностей и хрящевого матрикса (интактные, ограниченные, экстензивные поражения, тотальные деструкции). Огнестрельные повреждения кисти классифицируются на ограниченные (с вовлечением сегментов пальцев, тенарного или гипотенарного массивов), экстензивные (с поражением целого анатомического отдела или смежных зон с сохранением базовой хватательной функции), а также тотальные деструкции с утратой органной функции при разрушении ≥ 2 анатомических регионов [4]. Минно-взрывные и огнестрельные поражения стопы аналогично подразделяются на ограниченные, экстензивные и деструктивные (ампутационные) [4].

4. Неогнестрельные травмы конечностей (открытые/закрытые повреждения) в боевых условиях не демонстрируют принципиальных патоморфологических отличий от аналогичных травм в обычной жизни [4].

ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНЕЧНОСТИ

Верификация переломов базируется на обнаружении раневого дефекта и комплекса патогномичных симптомов: интенсивного болевого синдрома, локальной отечности тканей, образования гематомы, видимого укорочения или деформации сегмента, наличия аномальной подвижности вне зоны суставов, акустического феномена трения костных фрагментов (крепитации), а также резкого ограничения функциональных возможностей конечности; в отдельных клинических случаях в раневом канале визуально определяются костные отломки. Рентгенографическое исследование служит ключевым методом для объективной диагностики типа перелома и степени смещения костных фрагментов. Для детализации повреждений при переломах, локализованных в параартикулярной зоне или непосредственно внутри суставной капсулы, обязательным является выполнение компьютерной томографии. При огнестрельной этиологии переломов костных структур нижних конечностей клинически оправдано проведение ультразвукового дуплексного сканирования венозного русла для своевременного выявления тромботических осложнений и профилактики тромбоэмболии легочной артерии (ТЭЛА). При наличии соответствующих клинических показаний осуществляется дополнительное инструментальное обследование (например, УЗДГ, ангиография) для оценки состояния магистральных артериальных сосудов и целостности периферических нервных стволов [4].

Диагностика проникающих повреждений крупных суставов не вызывает диагностических затруднений в ситуациях с обширным раневым дефектом суставной капсулы, сопровождающимся истечением синовиального содержимого и непосредственным определением суставных структур в раневом канале. При отсутствии явной раны диагноз устанавливается на основании выявления характерной клинической картины: исчезновения анатомических границ сустава (сглаженность контуров) и увеличения его объема вследствие выпота, выраженной болезненности при пальпаторном исследовании и попытках пассивных/активных движений, а также положительного симптома баллотирования надколенника (флюктуации), патогномичного для гемартроза. Для окончательной верификации суставного ранения и определения его характеристик применяются:

- рентгенография и КТ — позволяют установить характер повреждения костных суставных компонентов (эпифизов) и локализацию рентгеноконтрастных инородных включений (осколков, пуль и т. п.);

- МРТ — является оптимальным методом для комплексной оценки степени и характера повреждения внутрисуставных и параартикулярных мягкотканых структур (связок, менисков, суставного хряща) [4].

РЕНТГЕНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ МИННО-ВЗРЫВНЫХ ПОРАЖЕНИЯХ

В рамках квалифицированной хирургической помощи раненым зачастую требуется рентгенологическое обследование, выполняемое в обязательном порядке в двух взаимоперпендикулярных проекциях. Данное исследование является ключевым для точной визуализации характера и степени повреждений костной ткани, а также для достоверного определения топографии рентгенопозитивных инородных включений (металлических осколков, пуль) [6].

КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ МИННО-ВЗРЫВНЫХ ПОРАЖЕНИЯХ

Высокая детализация компьютерной томографии способствует решению диагностических задач при неоднозначной клинической картине, обнаружению и различению разнообразных последствий боевых повреждений конечностей. Информационная емкость томографического снимка приблизи-

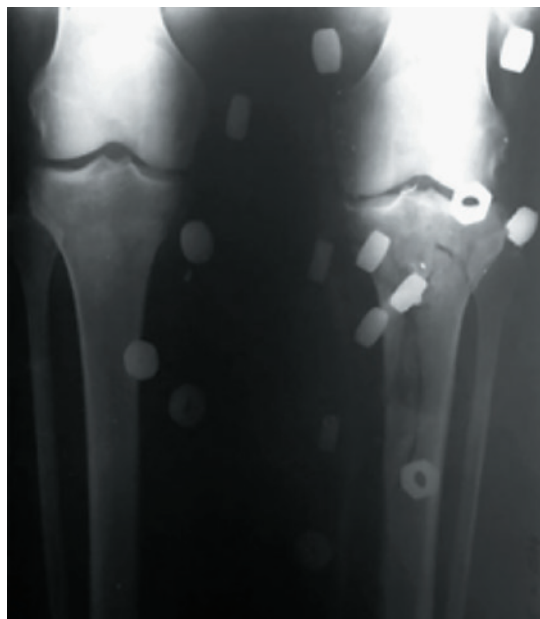


Рис. 8. Рентгенограмма области обоих коленных суставов, голеней пациентки Г. в передне-задней проекции [7]

Figure 8. Radiograph of the area of both knee joints, shins of patient G. in antero-posterior projection [7]



Рис. 9. Рентгенограмма в стандартных проекциях (б) раненого с огнестрельным осколочным ранением, многооскольчатый перелом большеберцовой кости после этапных первичной хирургической обработки и стабилизации аппаратом КСВП. Неосложненное заживление огнестрельной раны мягких тканей [4]

Figure 9. Radiograph in standard projections (б) of a wounded man with a gunshot shrapnel wound, a multi-fractured tibia fracture after staged primary surgical treatment and stabilization by a KSVP device. Uncomplicated healing of gunshot wounds of soft tissues [4]

тельно в 100–200 раз выше по сравнению со стандартной рентгенограммой [8–10].

Ключевыми диагностическими преимуществами метода являются: мультимодальная оценка костных и мягкотканых структур в едином исследовании; возможность проведения контралатерального сравнительного анализа анатомических областей; функция 3D-моделирования томограмм в любых требуемых плоскостях [11].

Компьютерная томография обеспечивает не только качественную, но и количественную верификацию параметров костной ткани посредством денситометрического анализа, что существенно минимизирует оператор-зависимую погрешность интерпретации [11]. Метод также позволяет объективно квантифицировать степень мышечной дегенерации [11].

Данная технология широко применяется при верификации хронического остеомиелита, главным образом для точного картирования зон деструкции костной ткани [11].

Метод успешно используется в диагностике хронического остеомиелита, как правило, для уточнения масштабов поражения [8, 9].

Ранние томографические признаки острого остеомиелита характеризуются отеком мягких тканей, остеопорозом и рассасыванием губчатого вещества кости с размытостью контуров. На поздних этапах визуализируются деструктивные очаги (зоны просветления) в кортикальном слое, а также выраженные периостальные наслоения, проявляющиеся формированием субпериостальных гнойных

скоплений и характерным остеолитическим дефектом по типу «скорлупы». У пациентов зрелого возраста вследствие деструктивных процессов может наблюдаться полная резорбция кортикальной пластинки, значительно повышающая риск возникновения патологических переломов [11]. Хроническая форма заболевания сопровождается интенсивными репаративными изменениями: на рентгенограммах визуализируется неравномерный локальный остеосклероз, окружающий участки деструкции, гипертрофированные периостальные наслоения, нередко формируются инкапсулированные гнойные очаги (абсцессы Броди) и кортикальные секвестры (фрагменты некротизированной костной ткани) [11].

Применение рентгеновской КТ в диагностике травматических поражений позволяет эффективно верифицировать точную топографию и количество рентгеноконтрастных инородных включений, а при динамическом наблюдении — своевременно идентифицировать формирующиеся очаги костной деструкции, секвестры, инкапсулированные абсцессы и гнойное пропитывание параоссальных тканей [7].

Также применение компьютерной томографии позволяет оценить псевдоартроз и несращение, что имеет важное значение для дальнейшего операционного планирования. Полезным инструментом для оценки псевдоартроза и несращения является VRT, которая может обеспечить трехмерное изображение кости. При этом методе показанные металлические части внешней рамы или гипса могут

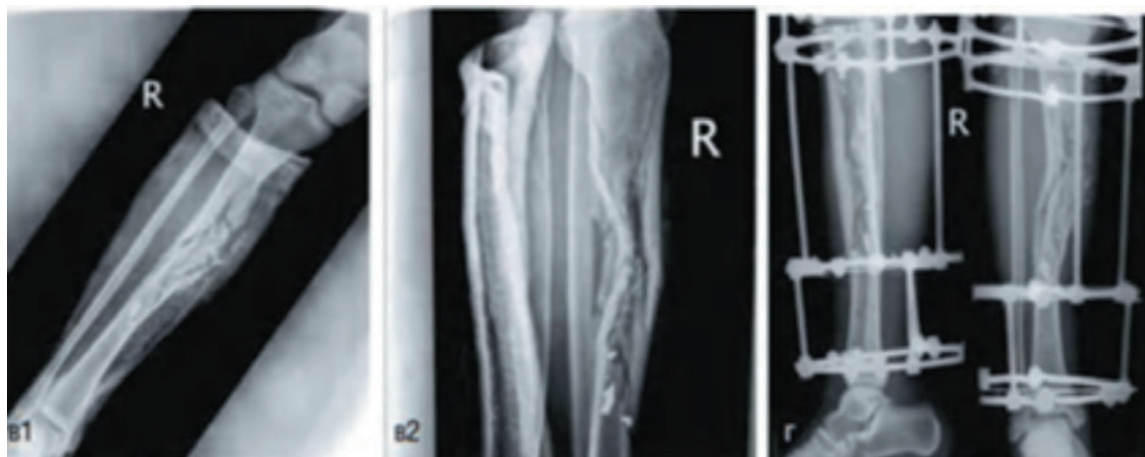


Рис. 10. Рентгенограммы в стандартных проекциях правой голени раненого с огнестрельным многооскольчатом переломом берцовых костей в средней трети до (в1, в2) и после (г) операции внешнего остеосинтеза аппаратом Илизарова [4]

Figure 10. Radiographs in standard projections of the right shin of a wounded man with a multi-splinter fracture of the tibia in the middle third before (в1, в2) and after (г) surgery of external osteosynthesis by Ilizarov apparatus [4]

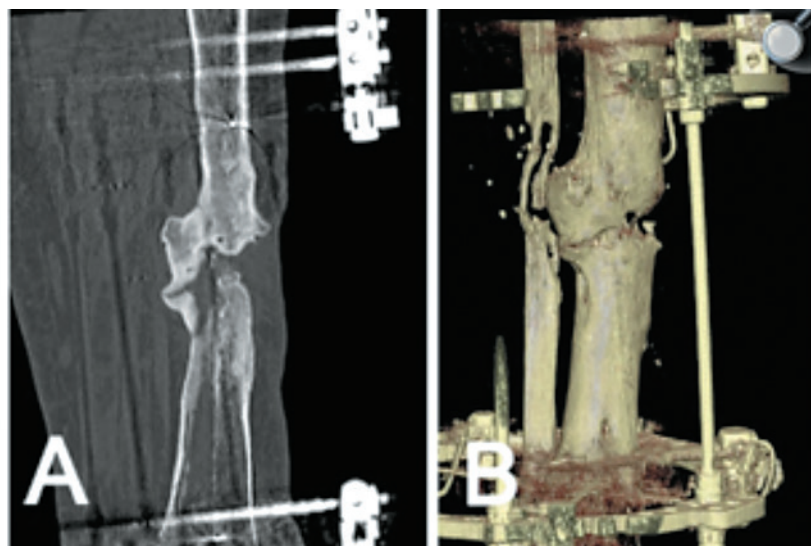


Рис. 11. Оценка несращения большеберцовой кости в 2D- (А) и 3D-проекции (В) [3]

Figure 11. Estimation of tibial nonunion in 2D (A) and 3D projections (B) [3]

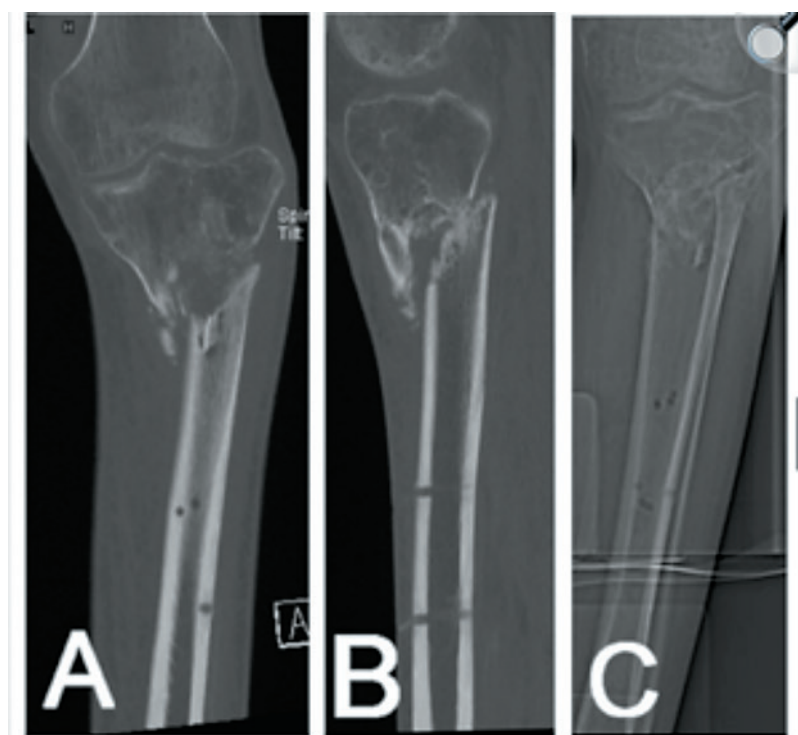


Рис. 12. Традиционное КТ-сканирование для планирования коррекции деформации при смещенном переломе проксимального отдела большеберцовой кости — двухмерная передняя проекция (А) и боковая проекция (В), показывающие трансляцию и варусную деформацию. Сканограмма конечности того же пациента в передней проекции (С) [3]

Figure 12. Traditional CT scanning for planning deformity correction in case of displaced fracture of the proximal tibia — two-dimensional anterior projection (A) and lateral projection (B), showing translation and varus deformity. Scan of the limb of the same patient in the anterior projection (C) [3]

быть удалены с изображения, чтобы лучше понять интересующую область [3].

Для измерений оси и выравнивания КТ-сканы с 2D- и 3D-представлениями способны предоставить изображения кости со всех сторон [3].

Технология объемного рендеринга (Volume-Rendering Techniques, VRT) значительно улучшает качество визуализации патологических изменений и обеспечивает эффективную обработку значительных массивов диагностической информации. Данный метод особенно ценен для выявления глубинных очагов поражения, слабо выраженных переломов со смещением и трудноразличимых патологических участков. Важным преимуществом VRT является способность минимизировать полосовые артефакты, включая случаи наличия металлических конструкций, фиксирующих элементов или эндопротезов [3].

Протокол КТ с низкой дозой для целей хирургического планирования может значительно снизить облучение по сравнению с традиционной КТ, не влияя на качество изображения или диагностическую эффективность [12, 13].

КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ АНГИОГРАФИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ МИННО-ВЗРЫВНЫХ ПОРАЖЕНИЯХ

При диагностике боевых повреждений особое значение имеет рациональный выбор методов лучевой диагностики, направленный на сокращение количества исследований при оценке состояния сосудистого русла. Это особенно важно при травмах магистральных сосудов [6].

Анализ данных современных вооруженных конфликтов свидетельствует, что повреждения крупных артерий встречаются в 3–5 % случаев боевой травмы. Распределение по анатомическим зонам следующее: нижние конечности — 61 % случаев, верхние конечности — 26 %, голова и шея — до 3 %, грудная клетка — около 6 %, брюшная полость и таз — 4 %.

Примечательно, что примерно 10 % пострадавших требуется экстренная ампутация конечности по жизненным показаниям [14].

Стандартные рентгенологические и ультразвуковые методики не обеспечивают достаточной точности в определении характера и степени повреждения магистральных сосудов различных анатомических областей, что ограничивает их ценность для оптимизации лечебной тактики при травмах и требует применения высокоинформативных визуализационных методик, среди которых первостепенное значение имеют мультиспираль-

ная КТ-ангиография и селективная ангиография. Данные технологии обеспечивают оперативную детекцию сосудистой патологии (включая разрывы, тромбозы и компрессионные стенозы), а также позволяют дифференцированно подходить к выбору хирургической стратегии — от открытой реконструкции до эндоваскулярных коррекций — за счет точной визуализации топографо-анатомических соотношений и характера повреждения [6].

В ходе различных стадий раневой болезни, а также в послеоперационном периоде при динамическом контроле МСКТ-ангиография служит ключевым и наиболее эффективным методом лучевой диагностики огнестрельных повреждений сосудов, применяемым у пациентов с тяжелыми травмами [6].

Для МСКТ-ангиографии могут быть использованы неионные высокоосмолярные рентгеноконтрастные препараты на основе йода (йоверсол/Оптирей, йогексол/Омнипак, йопромид/Ультравист, йодиксанол/Визипак) с концентрацией действующего вещества 320–370 мг/мл [6].

Показаниями к ангиографическому обследованию при травмах конечностей являются: огнестрельные ранения с массивной деструкцией тканей, политравмы минно-взрывного или осколочного генеза, а также раневые каналы в проекции магистральных сосудов, создающие повышенный риск их повреждения [6]. Дополнительным основанием служит выявление аномальных значений лодыжечно-плечевого индекса (АД-индекс < 0,9), требующее уточнения локализации и характера артериального дефекта, особенно при закрытых повреждениях [4]. В послеоперационном периоде визуализация обязательна при признаках несостоятельности реконструкции: отсутствии восстановления периферической пульсации, отрицательной динамике или нарастании ишемических явлений [6].

Методика выполнения

При выполнении МСКТ-ангиографии верхней конечности для оценки возможного сосудистого повреждения пациент обычно размещается в положении лежа на спине. Оптимально, если исследуемую руку поднимают вертикально вверх (при отсутствии противопоказаний). В случаях иммобилизации конечности гипсовой повязкой или наружным фиксирующим устройством, руку оставляют в естественном положении вдоль тела с приведенным локтевым суставом.

Протокол сканирования предполагает начало исследования на уровне дуги аорты с последующим продвижением в дистальном направлении (совпадающем с естественным сосудистым током) вплоть до лучезапястного сустава. Контрастное

усиление осуществляется путем внутривенного болюсного введения препарата. Во избежание артефактов, связанных с высокой локальной концентрацией контраста в венах, инъекцию предпочтительно выполнять в венозный доступ локтевой области (кубитальную вену) контралатеральной (противоположной) конечности. Для точного дозирования и скорости подачи контрастного вещества используется автоматический инъектор двухколбового типа [6].

МСКТ-ангиография сосудов нижней конечности осуществляется посредством мультисрезового сканирования в краниокаудальной плоскости. Область исследования охватывает сосудистую систему от уровня чревного ствола (диафрагмы) до дистальных отделов стопы. Контрастирование артериального русла достигается путем болюсной внутривенной инъекции специального препарата, подаваемого автоматическим инъектором двухколбового типа.

Важно отметить, что применение иммобилизирующих приспособлений (гипсовых повязок, аппа-

ратов внешней фиксации) не является препятствием для выполнения данного исследования [6].

Современные методики сканирования оптимизируются каждые 4–8 месяцев. Ярким примером прогресса служит разработка модифицированных протоколов, позволяющих радикально снизить лучевую нагрузку. Так, у пациентов с огнестрельными ранениями нижних конечностей применение специализированного протокола (с использованием технологии iDose и специально адаптированных параметров работы рентгеновской трубки) обеспечивает снижение дозы облучения более чем в 4 раза: до $4,8 \pm 0,4$ мЗв. Данный показатель соответствует величине годовой допустимой дозы естественного фона, в то время как при стандартной методике сканирования доза достигает $22,0 \pm$ [значение] мЗв [6].

Для диагностики предполагаемого венозного повреждения в нижних конечностях может быть использован метод восходящей (дистальной) МСКТ-флебографии. Процедура включает катетеризацию вены тыльной поверхности стопы на сто-

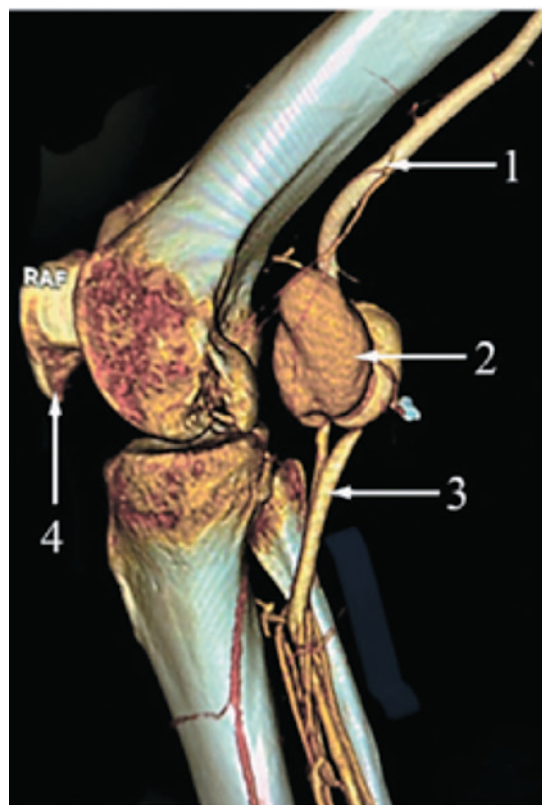


Рис. 13. МСКТ-ангиограмма, 3D-реконструкция:

1 — поверхностная бедренная артерия; 2 — аневризма подколенной артерии; 3 — подколенная артерия; 4 — отломок медиального мыщелка [15]

Figure 13. MSCT angiogram, 3D reconstruction: 1 — superficial femoral artery; 2 — popliteal artery aneurysm; 3 — popliteal artery; 4 — medial condyle fragment [15]

Таблица 2. Протокол дистальной МСКТ-флебографии нижних конечностей [6]**Table 2. Protocol of distal MSCT phlebography of the lower extremities [6]**

Параметры сканирования	МСКТ-флебография
Напряжение на рентгеновской трубке (kV)	80–100
Сила электрического тока, подаваемая на рентгеновскую трубку (mAs)	250–400
Время ротации трубки (с)	0,4–0,75
Pitch	0,9

роне поражения. Через установленный катетер производится автоматизированное болюсное введение смеси контрастного вещества и физиологического раствора в соотношении 2:1. Общий объем вводимого раствора составляет 100–130 мл при скорости инфузии 1,7–2,0 мл/с.

Сканирование выполняется синхронно с пробой Вальсальвы на пике ее эффективности и состоит из двух этапов. Первоначально томография проводится в каудокраниальном направлении — от дистальной трети голени до уровня слияния подвздошных вен (область бифуркации нижней полой вены). Сразу после осуществляется повторное сканирование в противоположном (краниокаудальном) направлении. Оба этапа исследования выполняются с использованием заранее заданных протокольных параметров.

Обработка полученных данных и реконструкция изображений осуществляется на специализированных рабочих станциях КТ-оборудования. Для трехмерной визуализации сосудистого русла применяются алгоритмы объемного рендеринга (Volume-Rendering Techniques, VRT). Плоскостной анализ сосудов проводится с использованием криволинейных мультипланарных реформаций (Curved Multiplanar Reformations, MPRs), основанных на принципе проекций максимальной интенсивности (Maximum Intensity Projections, MIPs).

Специалисты проводят оценку состояния артерий и вен на основе мультипланарных реконструкций, фокусируясь на:

- анализе проходимости сосудистого просвета;
- определении степени выраженности тромботических масс;
- расчете процента стеноза, учитывающего как изменение диаметра сосуда, так и уменьшение площади его поперечного сечения.

Селективная ангиография артерий конечностей выполняется с доступом через бедренную (трансфеморальный) или подмышечную (трансаксил-

лярный) артерии согласно классической методике Сельдингера [6].

Расчет ключевых метрик диагностической ценности выполняется по стандартным формулам:

чувствительность (Se) = $PS / (PS + NS)$;

специфичность (Sp) = $NH / (NH + PH)$;

общая точность (Ac) = $(PS + NH) / (PS + NH + PH + NS)$;

положительная прогностическая ценность (PVP) = $PS / (PS + PH)$;

отрицательная прогностическая ценность (PVN) = $NH / (NH + NS)$,

где:

Se — чувствительность;

Sp — специфичность;

Ac — общая точность [6].

МСКТ-ангиографические критерии активного геморрагического процесса [6] включают:

- патологическое гиперденсное образование вне сосудистых структур (исходная плотность +40...+60 HU), демонстрирующее значительное усиление (+70...+90 HU) в артериальную фазу контрастирования [6];

- экстравазацию контрастного вещества (визуализируемую как бесформенные скопления по типу «лужиц») за пределами артерий в раннюю контрастную фазу [6];

- признаки объемного воздействия (масс-эффекта) на прилежащие анатомические структуры [6].

У пациентов после сосудистых реконструкций МСКТ-ангиография подтверждает нормальное функционирование протеза/шунта или реконструированной артерии при наличии следующих признаков [6]:

- отсутствие зон сниженного контрастирования (дефектов наполнения) на всем протяжении просвета артерии, протеза или шунта [6];

- равномерный калибр и гомогенное контрастное заполнение по всей длине просвета артерии, протеза или шунта [6].

Гемодинамически значимый стеноз по данным МСКТ-ангиографии характеризуется такими признаками [6]:

- локальное концентрическое сужение артериального просвета с характерной перетяжкой по типу «песочных часов» [6];
- гиподенсная линейная зона, расположенная перпендикулярно оси сосуда (в проекции анастомоза или сосудистого шва) [6];
- пристеночный дефект наполнения в просвете артерии, указывающий на фрагментарный тромбоз в области шовной линии [6].

На аксиальных срезах, МР и 3D-реконструкциях МСКТ-ангиографии могут определяться признаки частичной тромботической окклюзии артерии или АВ-шунта/протеза [6]:

- участки дефекта контрастирования внутри сосудистого просвета [6];
- пристеночные тромботические массы [6];
- неровность внутренних очертаний протеза, шунта или артериальной стенки [6].

При полной тромботической закупорке поврежденной артерии или АВ-шунта/протеза МСКТ-ангиография фиксирует [6]:

- абсолютное отсутствие контрастирования просвета шунта, протеза или артерии [6];

- интенсивное развитие коллатеральных путей кровотока, обеспечивающих контрастирование дистального сосудистого русла пораженной конечности [6].

Основные признаки патологического артериовенозного соустья при травме магистральных сосудов конечностей, выявляемые при МСКТ-ангиографии, это [6]:

- одновременное контрастное заполнение артериального и венозного сосуда на уровне поврежденного сегмента [6];
- дефект стенки артерии и прилежащей вены на идентичном уровне [6];
- визуализация прямого сброса контрастированной крови из артериального русла в венозное через поврежденную стенку [6].

При МСКТ-ангиографии у пациентов с посттравматической псевдоаневризмой выявляются характерные сосудистые повреждения [6]:

- объемное образование сосудистого происхождения, анатомически связанное с пораженным

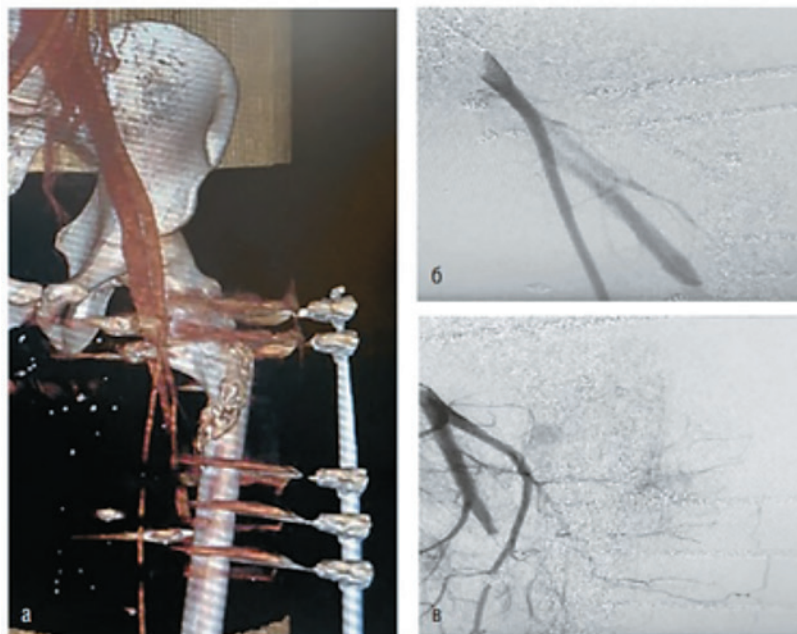


Рис. 14. Компьютерно-томографическая ангиография с диагностированной артериовенозной фистулой (а); артериография со сбросом контраста из ветви первого порядка глубокой бедренной артерии в глубокую бедренную вену (б); артериография после эмболизации спиралями (сброса в венозное русло нет) (в) [4]

Figure 14. Computed tomographic angiography with diagnosed arteriovenous fistula (a); arteriography with contrast relief from the first-order branch of the deep femoral artery into the deep femoral vein (б); arteriography after spiral embolization (there is no discharge into the venous bed) (в) [4]

сосудом, определяется при контрастном усилении в его проекции [6];

- дефект сосудистой стенки, через который происходит заполнение полости псевдоаневризмы, имеющей плотность контрастирования, идентичную плотности в просвете поврежденной артерии или вены [6];
- присутствие инородных тел в зоне сосудистой травмы [6].

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И СПЕЦИФИЧНОСТЬ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ АНГИОГРАФИИ

МСКТ-ангиография демонстрирует высокие показатели диагностической эффективности в различных клинических сценариях:

- оценка проходимости сосудистых шунтов/протезов: чувствительность (Se) 98 %, специфичность (Sp) 100 %, точность (Ac) 99 %, PVP 100 %, PVN 98 %;
- выявление гемодинамически значимых стенозов в шунтах/протезах: Se 92 %, Sp 100 %, Ac 99 %, PVP 100 %, PVN 99 %;

- диагностика повреждений артерий, протезов или шунтов: все показатели (Se, Sp, Ac, PVP, PVN) 100 %;

- верификация травматических артериовенозных соустьев магистральных сосудов конечностей: все показатели (Se, Sp, Ac, PVP, PVN) 100 %;

- выявление посттравматических ложных аневризм магистральных артерий конечностей: чувствительность, специфичность, точность, PVP и PVN достигают 100 % [6].

ВЫВОДЫ

На сегодняшний день не выработаны унифицированные критерии для оценки отдаленных последствий боевых травм. Широкий спектр развивающихся патологических изменений создает существенные трудности как в диагностике, так и в социальной адаптации пострадавших. Ключевая роль в преодолении этих проблем принадлежит методам медицинской визуализации [11].

Для войн и вооруженных конфликтов последних десятилетий характерно увеличение частоты минно-взрывных и осколочных ранений с преоб-

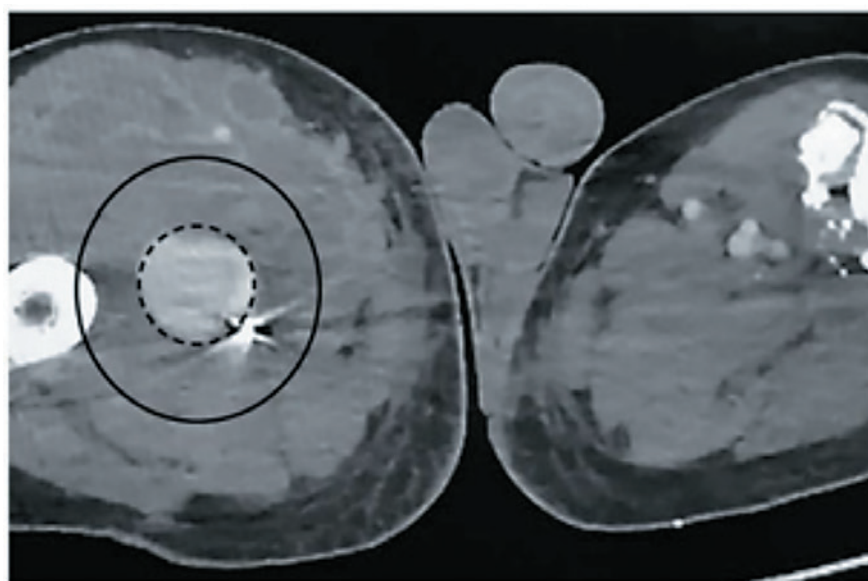


Рис. 15. Компьютерно-томографическая ангиография нижних конечностей. Внутритканевая гематома правого бедра (сплошная линия) с формирующейся артериальной ложной аневризмой в центре (пунктирная линия) при осколочном ранении глубокой бедренной артерии металлическим осколком (виден рядом с гематомой) [4]

Figure 15. Computed tomographic angiography of the lower extremities. Interstitial hematoma of the right thigh (solid line) with a developing arterial false aneurysm in the center (dotted line) with a fragmentation wound of the deep femoral artery by a metal fragment (visible next to the hematoma) [4]

ладанием повреждений головы и конечностей [16].

Несмотря на повсеместное использование ультразвукового сканирования и традиционной рентгенографии в качестве первоочередных методов при острых состояниях, их диагностическая ценность существенно снижается в случаях массивного повреждения тканей и присутствия множественных инородных тел (осколков). В связи с этим, при клинических признаках повреждения магистральных сосудов рук или ног и для выбора оптимальной хирургической тактики необходимо выполнение компьютерной томографической ангиографии.

При диагностике огнестрельных ранений крупных сосудов данный визуализационный подход превосходит рентгенографию по ключевым параметрам: чувствительности, специфичности и общей точности [6].

Что касается неотложного лучевого обследования раненых, таким методом следует признать компьютерную томографию, особенно для определения степени посттравматических изменений у пациентов с сочетанными травмами [11].

Конфликт интересов/ Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии потенциального конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Gianu K, Baldan M, Molde A. Military field surgery. Vol. II. The work of surgeons in conditions of limited resources during armed conflicts and other situations of violence. 2013. P. 377. In Russian [Жианну К., Балдан М., Молде А. Военно-полевая хирургия. Т. II. Работа хирургов в условиях ограниченности ресурсов во время вооруженных конфликтов и других ситуаций насилия. 2013. 377 с.].
2. Patel JA, White JM, White PW, et al. A contemporary, 7-year analysis of vascular injury from the war in Afghanistan. *J VascSurg.* 2018;68(6):1872–1879.
3. Zak L, Thiefenboeck TM, Wozasek GE. Computed Tomography in Limb Salvage and Deformity Correction — 3D Assessment, Indications, Radiation Exposure, and Safety Considerations. *J Clin Med.* 2021;10(17):3781.
4. Military field surgery. National leadership / edited by I. M. Samokhvalov. 2nd ed., revised and additional. Moscow: GEOTAR-Media, 2024. 1056 p. In Russian [Военно-полевая хирургия. Национальное руководство / под ред. И. М. Самохвалова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2024. 1056 с.].
5. Trishkin DV, Kryukov EV, Chuprina AP, et al. Methodological recommendations for the treatment of combat surgical trauma. 2022. 373 p. In Russian [Тришкин Д.В., Крюков Е.В., Чуприна А.П. и др. Методические рекомендации по лечению боевой хирургической травмы. 2022. 373 с.].
6. Obelchak I.S. Radiation diagnostics of damage to the main vessels in combat gunshot injury. 2020. 46 p. In Russian [Обельчак И.С. Лучевая диагностика повреждений магистральных сосудов при боевой огнестрельной травме. 2020. 46 с.].
7. Suchkov IA, Pshennikov AS, Yudin VA, et al. A case of mine-explosive injury to the lower extremities in peacetime. *Xirurgiya. Zhurnal imeni N. I. Pirogova=Surgery. The magazine named after N. I. Pirogov.* 2020;(7):97–101. In Russian [Сучков И.А., Пшенников А.С., Юдин В.А. и др. Случай минно-взрывной травмы нижних конечностей мирного времени. Хирургия. Журнал имени Н. И. Пирогова. 2020;(7):97–101].
8. Vinogradov BV, Maslennikova EN. The experience of using spiral computed tomography (MSCT) in the diagnosis of modern gunshot injury. *Spiral computed tomography — technology of the XXI century: Collection of scientific papers.* SPb: Voenno-medicinskaya akademiya. 1998. P. 13–14. In Russian [Виноградов Б.В., Масленникова Е.Н. Опыт использования спиральной компьютерной томографии (CRN) в диагностике современной огнестрельной травмы. Спиральная компьютерная томография — технология XXI века: Сб. науч. трудов. СПб: ВМедА, 1998. С. 13–14].
9. Karmazanovsky GG, Vasiliev NA, et al. The role of computed tomography in complex radiation diagnostics in the treatment of chronic osteomyelitis of the lower extremities and pelvis. *Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences.* 1994;(6):45–48. In Russian [Кармазановский Г.Г., Васильев Н.А. и др. Роль компьютерной томографии в комплексной лучевой диагностике при лечении хронического остеомиелита нижних конечностей и таза. Вестник Российской академии медицинских наук. 1994;(6):45–48].
10. Pretorius ES, Fishman EK. Helical CT of musculoskeletal infection. *Crit. Rev. Diagn. Imaging.* 2001;42(4–5):259–305.
11. Sozaonti ZR, Nizovtseva LA, Riden TV. Radiation studies for mine-blast injuries of the trunk and limbs. *Bulletin of Radiology and Radiology.* 2011. In Russian [Созаонти З.Р., Низовцова Л.А., Ридэн Т.В. Лучевые исследования при минно-взрывных травмах туловища и конечностей. Вестник рентгенологии и радиологии. 2011].
12. Su AW, Hillen TJ, Eutsler EP, et al. Low-dose computed tomography reduces radiation exposure by 90% compared to traditional computed tomography among patients who have undergone hip joint preservation surgery. *Arthrosc. J. Arthrosc. Relat. Surg.* 2019;35:1385–1392.

13. Yi JW, Park HJ, Lee SY, et al. Reduction of radiation dose with multi-detector CT in the assessment of fractures. Снижение дозы облучения при мультidetекторной КТ при оценке переломов. Br. J. Radiol. 2017; 90:20170240.
14. Yamenskov VV, Obratsov AV, Pinchuk OV, et al. Specialized surgical care in the treatment of combat injury of the main vessels. In the collection: Vishnevsky Readings 2023. Materials of the scientific and practical conference. Krasnogorsk. 2023. P. 14–16. In Russian [Яменсков В.В., Образцов А.В., Пинчук О.В. и др. Специализированная хирургическая помощь в лечении боевой травмы магистральных сосудов. В сб.: Вишневские чтения 2023. Материалы научно-практической конференции. Красногорск. 2023. С. 14–16].
15. Kyshtymov SA, Belov AK, Semashko AA, Grigoriev EG. Mine-explosion injury of the knee joint with damage to the popliteal artery. Polytrauma. 2025;1:41–45. In Russian [Кыштымов С.А., Белов А.К., Симашко А.А., Григорьев Е.Г. Минно-взрывная травма коленного сустава с повреждением подколенной артерии. Политравма / Polytrauma. 2025;1:41–45].
16. Denisov AV, Badalov VI, Krainyukov PE, et al. The structure and nature of modern combat surgical trauma. Voenno-meditsinskij zhurnal=Military Medical Journal. 2021;342(9):2–20. In Russian [Денисов А.В., Бадалов В.И., Крайнюков П.Е. и др. Структура и характер современной боевой хирургической травмы. Военно-медицинский журнал. 2021;342(9):2–20].
17. Vladimirova ES, Chernousov FA, Ivanov PA, et al. The specifics of mine and explosive damage, the provision of specialized assistance and rehabilitation of victims who were in the zone of terrorist operations. Bulletin of the medical institute "REAVIZ". 2024;14(6):47–58. In Russian [Владимирова Е.С., Черноусов Ф.А., Иванов П.А. и др. Особенности минно-взрывных поражений, оказание специализированной помощи и реабилитации пострадавших, находившихся в зоне террористических действий. Вестник медицинского института «РЕАВИЗ». 2024;14(6):47–58].
18. Polushin Yu.S. Explosive damage (lecture). Bulletin of Anesthesiology and Intensive Care Medicine. 2022;19(6):6–18. In Russian [Полушин Ю.С. Взрывные поражения (лекция). Вестник анестезиологии и реаниматологии. 2022;19(6):6–18].
19. Military traumatology and orthopedics: textbook / edited by V. V. Khominets. SPb: Voenno-meditsinskaya akademiya. 2023. 512 p. In Russian [Военная травматология и ортопедия: учебник / под ред. В. В. Хоминца. СПб: ВМедА. 2023. 512 с.].
20. Kryukov EV, et al. Stage-by-stage treatment of the wounded with injuries to the musculoskeletal system in modern armed conflict. Voenno-meditsinskij zhurnal=Military Medical Journal. 2023;345(3):4–16. In Russian [Крюков Е.В. и др. Этапное лечение раненых с повреждениями опорно-двигательной системы в современном вооруженном конфликте. Военно-медицинский журнал. 2023;345(3):4–16].
21. Management of limb injuries during disasters and conflicts. International Committee of Red Cross. 2016. 182 p.
22. Bagnenko SF, Petrikov SS, Minnullin IP, et al. Emergency medical care: National guidelines. 2025. 1032 p. In Russian [Багненко С.Ф., Петриков С.С., Миннуллин И.П. и др. Скорая медицинская помощь: национальное руководство. 2025. 1032 с.].
23. Adibi A, Krishnam MS, Dissanayake S, et al. Computed tomography angiography of lower extremities in the emergency room for evaluation of patients with gunshot wounds. Eur. Radiol. 2014;24:1586–1593.
24. Braunstein EM, Goldstein SA, Ku J, et al. Computed tomography and plain radiography in experimental fracture healing. Skelet. Radiol. 1986;15:27–31.
25. Etlik O, Temizöz O, Doğan A, et al. Three-Dimensional Volume Rendering Imaging in Detection of Bone Fractures. Electron. J. Gen. Med. 2004;1:48–52.
26. Kopp AF, Klingenbeck-Regn K, Heuschmid M, et al. Multislice Computed Tomography: Basic Principles and Clinical Applications. Eelectromedica. 2000;2:94–105.
27. Busquét AR, Acosta JA, Colón E, et al. Helical Computed Tomographic Angiography for the Diagnosis of Traumatic Arterial Injuries of the Extremities. J. Trauma Inj. Infect. Crit. Care. 2004;56:625–628.
28. Bogdan MA, Klein MB, Rubin GD, et al. CT angiography in complex upper extremity reconstruction. J. Hand Surg. 2004;29:465–469.
29. Schmidle G, Rieger M, Klauser A, et al. Intraosseous rotation of the scaphoid: Assessment by using a 3D CT model — An anatomic study. Eur. Radiol. 2014;24:1357–1365.
30. Mazziotti S, Blandino A, Gaeta M, et al. Postprocessing in Maxillofacial Multidetector Computed Tomography. Can. Assoc. Radiol. J. 2015;66:212–222.
31. Efimenko NA, Shapovalov VM, Dulaev AK, et al. Characteristics of combat trauma and therapeutic measures for gunshot fractures of the long bones of the extremities. Voenno-meditsinskij zhurnal=Military Medical Journal. 2003;5:4–12. In Russian [Ефименко Н.А., Шаповалов В.М., Дулаев А.К. и др. Характеристика боевой травмы и лечебные мероприятия при огнестрельных переломах длинных костей конечностей. Военно-медицинский журнал. 2003;5:4–12].
32. Kotiv BN, Samokhvalov IM, Badalov VI, et al. Military field surgery at the beginning of the 21st century. Voenno-meditsinskij zhurnal=Military Medical Journal. 2016;337(5):4–10. In Russian [Котив Б.Н., Самохвалов И.М., Бадалов В.И. и др. Военно-полевая хирур-

гия в начале XXI века. Военно-медицинский журнал. 2016;337(5):4–10].

33. Obelchak IS. Radiation diagnostics of vascular limb injuries in combat gunshot injury. Collection of abstracts of the Anniversary scientific and practical conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of the founding of the world's first X-ray Radiological Institute of the Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies named after A.M. Granov. SPb. 2018. P. 61. In Russian [Обельчак И.С. Лучевая диагностика сосудистых повреждений конечностей при боевой огнестрельной травме. Сборник тезисов Юбилейной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию основания первого в мире рентгенрадиологического института РНЦ радиологии и хирургических технологий им. А. М. Гранова. СПб. 2018. С. 61].

34. Mametyeva IA, Obelchak IS, Kukushkina EA, et al. Low-dose MSCT-AN protocol in the dynamic follow-up of patients after reconstructive interventions on the arteries of the lower extremities. Proceedings of the XI All-Russian National Congress of Radiation Diagnosticians and Therapists "Radiology-2017". May 23–25, 2017, Moscow. P. 70–71. In Russian [Маметьева И.А., Обельчак И.С., Кукушкина Е.А. и др. Низкодозовый протокол МСКТ-АГ в динамическом наблюдении пациентов после реконструктивных вмешательств на артериях нижних конечностей. Материалы XI Всероссийского национального конгресса лучевых диагностов и терапевтов «Радиология-2017». 23–25 мая 2017 г. Москва. С. 70–71].

Информация об авторах:

Климович Анастасия Михайловна, ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Фрумен Альбина Григорьевна, врач-рентгенолог ФГКУЗ «ГВКГ войск национальной гвардии РФ»;

Береговский Даниил Андреевич, ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Ефимцев Александр Юрьевич, д.м.н., доцент кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Труфанов Геннадий Евгеньевич, д.м.н., профессор, заведующий кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России.

Authors information:

Klimovich Anastasiya M., resident of the Department of Radiation Diagnostics and medical imaging with the clinic Almazov National Medical Research Centre;

Frumen Albina G., radiologist of Main Military Clinical Hospital of the Troops of the National Guard of the Russian Federation;

Beregovskii Daniil A., resident of the Department of Radiation Diagnostics and medical imaging with the clinic Almazov National Medical Research Centre;

Efimtsev Aleksandr Yu., doctor of medical sciences, associate professor of the Department of Radiation Diagnostics and medical imaging with the clinic Almazov National Medical Research Centre;

Trufanov Gennady E., doctor of medical sciences, professor, head of the department of radiation diagnostics and medical imaging with clinic of the Almazov National Medical Research Centre.