

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD62572>

Двухэнергетическая компьютерная томография рака головы и шеи

В.С. Петровичев¹, М.В. Неклюдова¹, В.Е. Сеницын², И.Г. Никитин¹¹ Национальный медицинский исследовательский центр «Лечебно-реабилитационный центр», Москва, Российская Федерация² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Выполнен обзор публикаций по диагностике рака области головы и шеи методом двухэнергетической компьютерной томографии (ДЭКТ); изучены результаты качественного и количественного анализа данных, полученных методом ДЭКТ с внутривенным контрастированием при опухолях данной локализации; показана важность построения йодных карт для получения дополнительной диагностической информации; описаны аспекты улучшения визуализации орфарингеальной области на фоне артефактов от стоматологических имплантатов. Ряд приведённых в статье научных работ освещает современное состояние вопроса и роль постпроцессинга «сырых данных» ДЭКТ, получения диапазона монохроматических изображений опухолевых и иных патологических изменений области головы и шеи, в том числе сравниваются ДЭКТ с внутривенным контрастированием и рутинная компьютерная томография с точки зрения уменьшения лучевой нагрузки на пациентов, в частности за счёт получения в ходе постобработки виртуальных нативных диагностических изображений из контрастной серии объёмов ДЭКТ. Обзор, помимо последних актуальных научных данных, включает также ссылки на работы по истории развития ДЭКТ как метода. Кратко изложены физические принципы, лежащие в основе ДЭКТ, и перспективы развития метода.

Ключевые слова: двухэнергетическая компьютерная томография; спектральная компьютерная томография; ДЭКТ; рак головы и шеи; плоскоклеточный рак.

Как цитировать

Петровичев В.С., Неклюдова М.В., Сеницын В.Е., Никитин И.Г. Двухэнергетическая компьютерная томография рака головы и шеи // *Digital Diagnostics*. 2021. Т. 2, № 3. С. 343–355. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD62572>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD62572>

Dual-energy computed tomography for head and neck cancer

Victor S. Petrovichev¹, Marina V. Neklyudova¹, Valentin E. Sinitsyn², Igor G. Nikitin¹

¹ Radiology Department, National Medical Research Treatment and Rehabilitation Centre of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russian Federation

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

This study reviewed the head and neck cancer diagnosis publications using dual-energy computed tomography (DECT). The qualitative and quantitative analysis of the data was DECT obtained using intravenous contrast enhancement for localized tumors, which shows the importance of constructing iodine maps for obtaining additional diagnostic information. Including the article is described aspects of improving visualization of the oropharyngeal region against the background of artifacts from dental implants. Several research articles highlight the current state of the issue and the role of post-processing of “raw data” DECT, obtaining a range of monochromatic images of a tumor and other pathological changes in the head and neck region in the article. Several learned treatises were also reflected. DECT with intravenous contrast enhancement and routine computed tomography to reduce radiation exposure to patients were compared particularly due to the possibility of obtaining virtual native diagnostic images from a contrasting series of DECT volumes during post-processing. In addition, this review also includes references to works that highlight the development of DECT as the method. Finally, the physical principles underlying DECT and the prospects for the development of the method are briefly represented.

Keywords: dual energy computed tomography; spectral computed tomography; DECT; head and neck cancer; squamous cell carcinoma; SCC.

To cite this article

Petrovichev VS, Neklyudova MV, Sinitsyn VE, Nikitin IG. Dual-energy computed tomography for head and neck cancer. *Digital Diagnostics*. 2021;2(3):343–355. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD62572>

Received: 03.03.2021

Accepted: 15.06.2021

Published: 01.07.2021

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD62572>

双能计算机断层扫描用于头和颈癌

Victor S. Petrovichev¹, Marina V. Neklyudova¹, Valentin E. Sinitsyn², Igor G. Nikitin¹

¹ Radiology Department, National Medical Research Treatment and Rehabilitation Centre of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russian Federation

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

简评

对使用双能计算机断层扫描 (DECT) 诊断头颈癌的出版物进行了审查；研究了通过 DECT 方法获得的数据的定性和定量分析结果，并在该定位的肿瘤中进行了静脉对比增强；显示了构建碘图以获得额外诊断信息的重要性；描述了在牙种植体伪影的背景下改善口咽区域可视化的方面。文章中介绍的许多科学作品强调了当前的技术水平和“原始数据”DECT 后处理的作用，获得了一系列头颈部肿瘤和其他病理变化的单色图像，包括将 DECT 与静脉造影增强和常规计算机断层扫描在减少患者辐射负荷方面进行比较，特别是由于在后处理期间从 DECT 体积的对比系列中获取虚拟原生诊断图像。除了最新的相关科学数据外，该评论还包括对 DECT 作为一种方法的发展历史的著作的参考。简要概述了 DECT 的物理原理和该方法的发展前景。

关键词：双能计算机断层扫描；光谱计算机断层扫描；DECT；头和颈癌；鳞状细胞癌。

引用本文

Petrovichev VS, Neklyudova MV, Sinitsyn VE, Nikitin IG. 双能计算机断层扫描用于头和颈癌. *Digital Diagnostics*. 2021;2(3):343–355. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD62572>

收到: 03.03.2021

接受: 15.06.2021

发布日期: 01.07.2021

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность ранней диагностики рака головы и шеи обусловлена лидирующими позициями данной патологии в структуре заболеваемости злокачественными новообразованиями во всём мире [1]. В России отмечается неуклонный рост числа пациентов с впервые выявленными злокачественными новообразованиями области головы и шеи [2].

Очевидно, что клинический и эндоскопический осмотры позволяют оценить состояние слизистой оболочки полости рта и языка, гортани и гортаноглотки. Однако подслизистые отделы остаются при этом неохваченными. Плоскоклеточный рак может иметь как экзофитный, так и эндофитный характер роста, но чаще отмечается смешанный тип. Если первичная или рецидивная опухоль определяется на слизистой оболочке, мы достоверно не можем оценить её подслизистый компонент (только косвенно при пальпации) [3, 4]. После химиолучевой терапии формируется зона стекловидного отёка, изменяющая нормальную анатомию, а также вид и плотность слизистой оболочки. Корень языка, парафарингеальные и параззофагеальные пространства, элементы гортани и гортаноглотки, утолщаясь и увеличиваясь в объёме, могут становиться причиной дисфагии и диспноэ и затруднять эндоскопический осмотр [5]. После проведения иммунотерапии плоскоклеточного рака головы и шеи возможна псевдопрогрессия, в частности увеличение размеров и протяжённости опухоли, требующая строгого динамического контроля для исключения истинного прогрессирования заболевания [6, 7]. Все это обуславливает необходимость использования методов объективного динамического контроля, таких как компьютерная (КТ) и магнитно-резонансная (МРТ) томография. Методы гибридной визуализации (позитронно-эмиссионная или однофотонная эмиссионная компьютерная томография, совмещённые с компьютерной томографией) менее доступны вследствие недостаточного количества сканеров для охвата населения и более высокой стоимости исследования. Кроме того, имеется ограничение по срокам проведения гибридной диагностики в процессе лечения: для более надёжной дифференциации между воспалительными и опухолевыми изменениями после курсов химиолучевой терапии и хирургического вмешательства должно пройти не менее 3 мес [8, 9].

МРТ является эффективным методом диагностики опухолей головы и шеи. Использование современных базовых импульсных последовательностей решает разнообразные диагностические вопросы. Так, T1, T1 с контрастным усилением, T2 взвешенные последовательности и последовательности с жироводавлением наиболее оптимальны для визуализации воспалительных изменений, стадирования опухолевого поражения, выявления эмбриональных опухолей развития. Сосудистые и перфузионные последовательности применяются

для исключения сосудистых мальформаций и оценки микроциркуляторных параметров тканевой перфузии. Диффузионно-взвешенные изображения могут быть полезны для визуализации холестеатомы, а также оценки злокачественности и ответа на лечение, выявления рецидивной или остаточной опухоли при раке области головы и шеи [10, 11]. Наряду с очевидными достоинствами метода хорошо известно, что время выполнения полноценного МР-исследования, включающего в себя различные импульсные последовательности, более продолжительное в сравнении с КТ, что ограничивает пропускную способность сканера и количество возможных исследований в течение дня.

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Физические методы, лежащие в основе взаимодействия рентгеновского излучения с веществом и обеспечивающие проведение двухэнергетического сканирования, — это фотоэффект, эффект Комптона и рассеяние Томсона.

Основной принцип двухэнергетической компьютерной томографии (ДЭКТ) базируется на том, что различные анатомические структуры и ткани могут иметь одинаковую или разную плотность в зависимости от энергии рентгеновского излучения, под воздействием которой они находятся — в диапазоне между высокими и низкими значениями кВт. Ключевым преимуществом использования двухэнергетических систем является возможность декомпозиции или разложения изображений на лежащие в их основе материалы. В этом случае происходит регистрация различных затуханий при разных энергиях рентгеновского излучения. Это позволяет выявить, сколько каждого материала присутствует в том или ином вокселе изображения. Это даёт более широкие возможности для постпроцессинга получаемых объёмов изображений (рисунок). Например, становится возможным выполнять построение виртуальных неконтрастных изображений, вычитание костных структур и производить анализ рентгеноконтрастного конкремента. Кроме этого, возможно построение йодных карт с получением изолированных изображений йода.

Сам метод ДЭКТ получил известность ещё на заре КТ, однако его применение было ограничено преимущественно оценкой минеральной плотности костной ткани [12, 13]. Сравнительно недавно в клиническую практику обследования пациентов, страдающих злокачественными опухолями головы и шеи, начали внедрять ДЭКТ. Для этого метода используют либо сканеры с двумя источниками энергии, либо применяют быстрое переключение силы тока на рентгеновской трубке томографа в процессе сканирования.

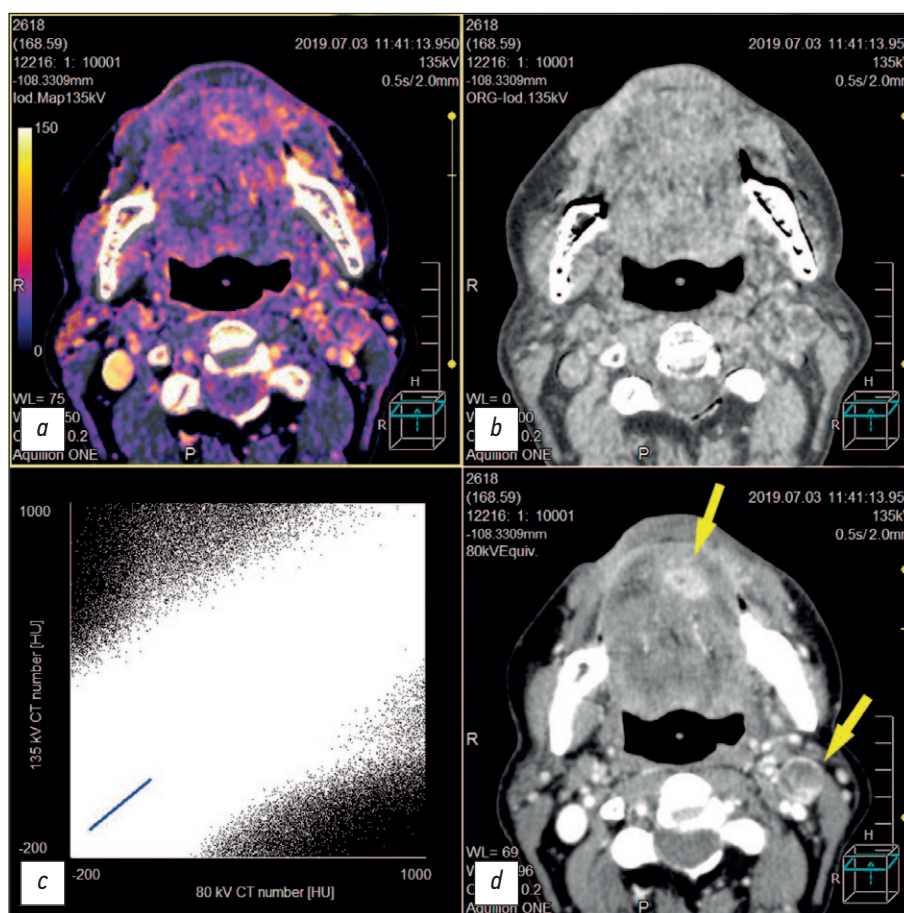


Рис. Двухэнергетическая компьютерная томография после химиолучевой терапии плоскоклеточного рака дна полости рта с распространением на язык. Остаточная опухоль нижней поверхности языка и метастазы с распадом в подчелюстной лимфатический узел слева (жёлтые стрелки). *a* — йодная карта; *b* — виртуальное бесконтрастное изображение; *c* — график распределения пикселей для отдельного среза между высоким и низким значением кВ; *d* — монохроматическое изображение с низким значением, равным 80 кВ.

ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ОБЛАСТИ ГОЛОВЫ И ШЕИ

В одной из ранних научных работ не было найдено существенных отличий в качестве анатомических изображений области головы и шеи между двухэнергетической (сила тока на трубке 80 и 140 КВт) и рутинной мультиспиральной компьютерной томографией (МСКТ; сила тока на трубке 120 КВт). Вместе с тем отмечалась меньшая лучевая нагрузка на пациентов при ДЭКТ [14]. Параллельно с этим, начиная с 2010 г., многочисленные исследования были посвящены оценке возможностей двухэнергетической компьютерной ангиографии патологии брахицефальных артерий [15–25]. По мнению A. Schwahofer и соавт. [26], использование моноэнергетических реконструкций, получаемых в ходе постпроцессинга объёмов ДЭКТ, позволяет уменьшить артефакты от металла в полости рта лишь в случае плотности последнего не более $4,5 \text{ г/см}^3$ (например, титана или алюминия). Это мало применимо для расчёта суммарной очаговой дозы, однако может быть полезно для разграничения анатомических ориентиров зоны

интереса при планировании лучевой терапии. При артефактах от металла зубов с плотностью источника свыше $4,5 \text{ г/см}^3$ отмечалось лишь небольшое подавление артефактов. Большинство пациентов, включённых в это исследование, имели металлосодержащие зубные протезы или иные стоматологические металлоконструкции с ещё большей плотностью ($>10 \text{ г/см}^3$). Из этого можно сделать вывод, что моноэнергетические реконструкции не являются универсальным инструментом уменьшения артефактов от металла с учётом задач планирования лучевой терапии [26].

В противовес этому, по данным J. Weiß и соавт. [27], режим подавления артефактов от металла (IMAR) позволяет улучшить визуализацию области полости рта и окружающих анатомических структур на фоне артефактов от стоматологических имплантатов. Изображения и их диагностическая значимость оценивались качественно по шкале Лайкерта и количественно в единицах Хаунсфилда (HU). В ходе исследования выяснилось, что в 30 случаях при подавлении артефактов от металлов изображения становились информативнее, чем без использования данного режима ($3,8 \pm 0,5$ против $2,6 \pm 0,5$ соответственно; $p < 0,0001$). Количественная оценка

измерения степени артефактов с помощью единиц HU дала коррелирующие результаты. Полученные данные были достоверно меньше при подавлении артефактов от металла в сравнении со стандартной реконструкцией ($0,9 \pm 1,6$ против 20 ± 47 соответственно; $p < 0,05$) [27].

По результатам исследования N. Große Hokamp и соавт. [28], гипо- и гиператтенуирующие артефакты в виртуальных моноэнергетических изображениях (virtual monoenergetic images, VMI) с высокими значениями килоэлектронвольт (кЭв) по сравнению с изображениями обычного КТ (CI) показали **увеличение и уменьшение** значений единиц HU (CI/VMI_{200кЭв}: $-218,7/-174,4$ HU, $p=0,1$, и $309,8/119,2$, $p=0,05$ соответственно). Артефакты в жире также уменьшились на виртуальных моноэнергетических изображениях с высокими значениями кЭв (CI/VMI_{200кЭв}: $23,9/16,4$, $p=0,05$). Было выявлено качественное снижение сверхплотных артефактов на виртуальных моноэнергетических изображениях с высокими — ≥ 100 — значениями кЭв (например, CI/VMI_{200кЭв}: $2(1-3)/3(1-5)$, $p=0,05$). Уменьшение выраженности артефактов позволило улучшить визуализацию мягкого неба и щёк (например, CI/VMI_{200кЭв}: $2(1-4)/3(1-5)$ и ещё $2(1-5)/3(1-5)$, $p \leq 0,05$). В целом виртуальные моноэнергетические изображения, полученные в ходе постпроцессинга объёмов ДЭКТ, уменьшают выраженность артефактов от зубных имплантатов, улучшая диагностику окружающих мягких тканей [28].

По результатам другого исследования, использование высокоэнергетических VMI **может уменьшить** выраженность артефактов, ослабляя параллельно наряду с этим визуализацию йодсодержащих контрастных препаратов в опухолевой ткани. В целом высокоэнергетические VMI (< 100 кЭв) позволяют достичь умеренного уменьшения артефактов при сохранении достаточной визуализации йодсодержащих контрастных препаратов, представляя собой полезные дополнительные диагностические изображения для оценки рака головы и шеи [29]. Это подтверждают данные исследования E. Liao [30], согласно которым ДЭКТ способствует улучшению визуализации области головы, шеи и позвоночника на фоне артефактов от металлических имплантатов. По оценкам других авторов, метод спектральной КТ улучшает лучевую диагностику злокачественных новообразований области головы и шеи [31–36].

Целью исследовательской работы A.M. Tawfik и соавт. [37] явилось улучшение визуализации опухоли области головы и шеи. Сюда вошла оценка изображений, полученных при разных факторах взвешенности (0,3; 0,6; 0,8) для 80 и 140 кВт, и оценка очертаний опухолевого очага. Частью исследования стали 35 человек со злокачественными новообразованиями головы и шеи, отобранные из 60 пациентов, обратившихся с подозрением на рак. В своей работе авторы провели сравнение таких параметров, как соотношение сигнал–шум, измерение затухания сигнала и объективный шум между различными

наборами изображений области головы и шеи. Результаты были проанализированы двумя независимыми радиологами, оценивавшими следующие параметры: очертание очага, резкость изображения, субъективный шум. При оценке использовались пятибалльные шкалы. Учёные пришли к выводу, что смешивание диагностических данных ДЭКТ, полученных при токе на трубке 80 и 140 кВт с использованием весового коэффициента 0,6 (60% от данных 80 кВт), улучшает соотношение сигнал–шум от опухолевого очага, субъективно повышает общее качество изображения, включая границы опухоли. Данный весовой коэффициент показал больше диагностической информации, чем коэффициент 0,3, симулирующий значения тока на трубке 120 кВт и максимально приближенный к изображениям стандартного МСКТ [37].

По мнению M. Li с соавт. [38], **анализ состава материала** в сочетании с реконструированными монохроматическими изображениями при использовании ДЭКТ обладает многообещающим потенциалом для дифференциальной диагностики узлов щитовидной железы и уточнения степени их злокачественности.

При оценке местной распространённости рака гортани большое значение имеет определение степени инвазии щитовидного хряща. В работе, посвящённой данной диагностической проблеме, предложили оценивать степень инвазии по пятибалльной шкале: истинная инвазия начиналась с эрозии (3 балла), а заканчивалась прорастанием хряща (5 баллов). Эти данные были проанализированы для йодных карт и средневзвешенных изображений. Чувствительность, специфичность и точность средневзвешенных изображений и йодных карт в оценке прорастания щитовидного хряща составила 100%. Только в одном случае на средневзвешенных изображениях было пропущено полное прорастание щитовидного хряща плоскоклеточным раком складчатого отдела гортани, но распространённость была уточнена на йодных картах [39].

Возможности метода в оценке хрящевого каркаса гортани были описаны ещё в ряде исследований. В частности, R. Forghani соавт. [40] отметили различия в затухании сигнала на виртуальных монохроматических изображениях (≥ 95 кЭв) плоскоклеточного рака головы и шеи в сравнении с неосифицированным щитовидным хрящом гортани. В другом исследовании группа учёных из Японии и США провела сравнение МРТ и ДЭКТ в оценке поражения хрящевого каркаса гортани в целом и щитовидного хряща в частности при плоскоклеточном раке головы и шеи. ДЭКТ показала более высокую специфичность, чем МРТ. Такие данные были получены как для инвазии всего хрящевого каркаса гортани (84% для МРТ против 98% для ДЭКТ, $p < 0,004$), так и отдельно для щитовидного хряща (64% против 100% соответственно, $p < 0,001$). Средняя площадь под кривой (0,94 против 0,95, $p=0,70$). Чувствительность методов для решения аналогичной задачи была без значимых различий

для всего хрящевого каркаса гортани (97% для МРТ против 81% для ДЭКТ, $p=0,16$) и отдельно для щитовидного хряща (100% против 89% соответственно, $p=0,50$), вместе с тем прослеживалась тенденция к более высокой чувствительности МРТ. ДЭКТ помогает избежать переоценки степени инвазии хрящей гортани, которая может являться следствием воспалительных изменений. Это достигается посредством использования соответствующих диагностических критериев на средневзвешенных изображениях (WA) и йодных картах (IO) как для оссифицированных, так и неоссифицированных хрящей гортани. Вместе с тем при ДЭКТ может быть пропущена небольшая опухолевая инвазия оссифицированных хрящей гортани, что обуславливает ценность метода именно в отсутствии переоценки степени инвазии хрящевого каркаса гортани и способствует таким образом росту числа органосохраняющих подходов к лечению плоскоклеточного рака гортани и гортаноглотки [41].

В работе J.L. Wichmann и соавт. [42] оценивалась диагностическая точность серий изображений ДЭКТ (80 кВт и линейно-смешанных 120 кВт) в 170 случаях различной патологии области головы и шеи. Последующий анализ проводился тремя независимыми радиологами, имевшими направление на исследования, включающие клиническое обоснование. Другие данные, включая изображения иных диагностических модальностей, экспертам не были доступны. Выводы сопоставлялись с медицинской документацией, заключениями КТ и гистологическими заключениями. Чувствительность, специфичность, положительная прогностическая значимость и отрицательная прогностическая значимость рассчитывались отдельно для каждого исследователя. Соглашение между радиологами-экспертами оценивалось с использованием внутриклассовых коэффициентов корреляции. В диагностические группы были вынесены следующие клинические нозологии: плоскоклеточный рак ($n=107$; наличие/отсутствие для первичного/рецидивирующего плоскоклеточного рака), лимфома ($n=40$; наличие/отсутствие для первичной/рецидивирующей лимфомы) и доброкачественные заболевания ($n=23$; например, абсцесс). Совокупная чувствительность, специфичность, положительная прогностическая ценность и отрицательная прогностическая ценность для серии изображений 80 кВт и линейно-смешанных изображений 120 кВт составили 94,8; 93,0; 95,9 и 91,1% соответственно. Результаты (%) для группы пациентов, страдающих плоскоклеточным раком, были также очень высокими: 94,8/95,3; 89,1/89,1; 94,3/94,4; 90,1/91,0; похожая картина и с заболеваниями, связанными с лимфомой: 95,0; 100,0; 100,0; 95,2% для серий изображений 80/120 кВт. Соглашение между исследователями было почти идеальным (коэффициент внутриклассовой корреляции 0,82; 0,80; 95% ДИ 0,76–0,74, 0,86–0,85). Поглощённая доза на длину сканирования была почти на 48% ниже при 80 кВт по сравнению со стандартными 120 кВт

сканами (135,5 против 282,2 мГр/см). Исследователи пришли к выводу, что КТ на низких киловольтах (80 кВт) обладает высокой разрешающей способностью, обеспечивая хорошую точность диагностики для рутинной клинической практики, а также позволяет существенно снизить лучевую нагрузку на пациента [42].

В ряде других исследований были получены похожие данные, свидетельствующие об улучшении визуализации первичного рака области головы и шеи в ходе постпроцессинга данных ДЭКТ с двумя источниками энергии при построении нелинейного смешивания изображений, по сравнению с линейным смешиванием изображений на низких и высоких энергиях — 80/140 кВт [43]. По мнению S. Lam и соавт. [44], наиболее хорошая визуализация мягких тканей области головы и шеи на виртуальных монохроматических изображениях — на 65 кЭв, тогда как оптимальное соотношение контраст–шум для визуализации плоскоклеточного рака — на 40 кЭв. Это связано с разницей затухания сигнала от опухоли и непоражённых окружающих мягких тканей ($p=0,03$).

Группа учёных из Китая изучала возможности ДЭКТ в выявлении и дифференциальной диагностике метастатически поражённых шейных лимфоузлов при плоскоклеточном раке области головы и шеи и различных видах лимфопролиферативных заболеваний. Они пришли к выводу, что оптимальная визуализация поражённых лимфоузлов достигалась на моноэнергетических изображениях 70 кЭв. Дизайн работы также учитывал наклон спектральной кривой рентгенопроницаемости мягких тканей для молекул йода в зависимости от значения кЭв [45]. По данным F. Fu с соавт. [46], виртуальные не-контрастные изображения при визуализации метастатически поражённых шейных лимфоузлов, полученные в ходе постпроцессинга ДЭКТ, сопоставимы по качеству с полноценным нативным исследованием. При этом такие изображения имеют более низкую эффективную дозу облучения пациента в сравнении со стандартным нативным исследованием ($p < 0,05$). Сочетание ДЭКТ с внутривенным контрастированием и последующим построением виртуальных нативных изображений позволяет обеспечить адекватную визуализацию вторично поражённых лимфатических узлов с более низкой лучевой нагрузкой на пациента [46].

Автор из Канады R. Forghani [47], сравнивая реконструкции и возможности постобработки методами ДЭКТ с одним источником энергии и быстрым переключением киловольтаж (кВт) на рентгеновской трубке и ДЭКТ с двумя источниками энергии, предложила использовать постпроцессинг для оптимальной визуализации мягких тканей шеи. Виртуальные моноэнергетические реконструкции для всех вариантов сканирования области шеи — на 65 и 40 кЭв минимум, для диагностики опухолей гортани — аналогичные реконструкции и построение йодных карт, а также виртуальные моноэнергетические реконструкции на 95 кЭв (или на более высоких

значениях) для диагностики опухолей гортани. Все вышеперечисленное, за исключением йодных карт, автор предлагает использовать для визуализации опухолей полости рта и ротоглотки и уменьшения дентальных артефактов [47]. Похожие данные приводит и другой коллектив учёных [48].

Изучение дифференциальной диагностики спектральной томографии в исключении остаточной или рецидивной опухоли после специального лечения приводится в работе международной группы авторов. Так, по данным небольшого когортного исследования Н. Yamauchi и соавт. [49], при сравнении виртуальных моноэнергетических реконструкций на 40 и 70 кЭв, первые позволяют лучше проводить дифференциальную диагностику рецидивной или остаточной опухоли от доброкачественных изменений, обусловленных проведённым лечением. По данным L. Yang и соавт. [50] отмечены отличия в концентрации йода, воды и наклона спектральной кривой в поражённых шейных лимфоузлах у пациентов с разными нозологическими группами заболеваний, а именно раком щитовидной и слюнных желёз, лимфомами и плоскоклеточным раком.

M.S. May и соавт. [51] проводили сравнение двухэнергетического и моноэнергетического сканирования (70 кВт) на ДЭКТ-сканере с двумя источниками энергии у пациентов, страдающих злокачественными заболеваниями области головы и шеи: первый позволяет лучше визуализировать границы опухоли при построении моноэнергетических реконструкций на 40 кЭв. Выполнение моноэнергетического сканирования на 70 кВт целесообразно для уменьшения артефактов при наличии металлических имплантатов в полости рта. Похожие результаты при сравнении двухэнергетического и стандартного КТ-сканирования пациентов с плоскоклеточным раком головы и шеи получила группа учёных из Канады [52].

По мнению R. Forghani и соавт. [53–55], различные реконструкции ДЭКТ в сочетании с последующим количественным анализом могут потенциально улучшить характеристики оценки ткани и визуализацию опухоли, включая инвазию процесса в анатомические структуры, что может оказать влияние на тактику ведения пациента. L. Yang и соавт. [56] с помощью ДЭКТ оценивали терапевтический ответ на химиолучевую терапию в двух группах пациентов, страдающих раком гортани и гортаноглотки с полной и неполной ремиссией. Спектральная кривая имела разный наклон в зависимости от наличия или отсутствия остаточной опухоли. Проведённый ROC-анализ диагностической эффективности показал площадь под кривой 0,83. Эта группа других учёных, оценивая эффект до и после лучевой терапии по поводу рака пищевода, предположила, что построение йодных карт при постпроцессинге ДЭКТ позволяет оценивать концентрацию йода в обоих случаях. Это даёт возможность оценивать эффект химиолучевой терапии, избегая при этом увеличения дозы облучения в процессе лечения [57].

Был предложен интересный способ оценки рака носоглотки посредством ДЭКТ за счёт измерения концентрации наночастиц золота, прикреплённых к фолиевой кислоте в качестве линкера. Особенность ДЭКТ состоит в возможности декомпозировать исследуемый материал, что позволяет разделять и идентифицировать различные элементы в исследуемых тканях, в частности наночастицы золота. Данный способ диагностики является фактически молекулярной таргетной визуализацией раковых клеток носоглотки [58].

В последнее время приобретает значение «машинное обучение» при раке области головы и шеи. Одна группа авторов описывает преимущества автоматизированного мультиэнергетического текстурного анализа мягких тканей всех серий изображений в сравнении с анализом отдельных моноэнергетических реконструкций на предмет прогнозирования локорегионального метастатического поражения лимфатических узлов [59]. Другой коллектив учёных изучал возможности ДЭКТ в оценке лимфатических узлов области шеи при различных неопластических поражениях, включая лимфопролиферативные заболевания, с применением машинного обучения [60]. Данное направление представляет научный и практический интерес и требует дальнейшего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, дополнение обследования пациентов с подозрением на рак области головы и шеи ДЭКТ с внутривенным болюсным контрастированием позволяет получить более подробную информацию в сравнении с обычной контрастной МСКТ. Метод ДЭКТ позволяет декомпозировать получаемые изображения на лежащие в их основе материалы, в частности получать как изолированные, так и смешанные йодные карты области интереса — опухолей и метастатически поражённых регионарных лимфатических узлов. Данная информация может иметь диагностическую ценность при динамическом обследовании пациентов после проведённого специального противоопухолевого лечения, в частности дистанционной лучевой, химио- и иммунотерапии.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении поисково-аналитической работы и подготовке публикации.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. В.С. Петровичев — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; М.В. Неклюдова — обзор литературы, подготовка и написание текста статьи; В.Е. Сеницын — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, подготовка

и редактирование статьи; И.Г. Никитин — сбор и анализ литературных источников, редактирование статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Благодарности. Авторы выражают благодарность Наталии Георгиевне Покровской за помощь в стилистическом редактировании текста статьи.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Conflict of interest. The authors declare no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Authors' contribution. V.S. Petrovichev — literature review, collection and analysis of literary sources, text writing and article editing; M.V. Neklyudova — review of literature, preparation and writing of the text of the article; V.E. Sinitsyn — literature review, collection and analysis of literary sources, preparation and editing of the article; I.G. Nikitin — collection and analysis of literary sources, article editing. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to Nataliya G. Pokrovskaya for support in stylistic editing of the article text.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bray F., Ferlay J., Soerjomataram I., et al. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries // *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 2018. Vol. 68, N 6. P. 394–424. doi: 10.3322/caac.21492
2. Социально значимые заболевания населения России в 2018 году. Статистические материалы. Москва, 2019. С. 15–17.
3. Pynnonen M.A., Gillespie M.B., Roman B., et al. Clinical practice guideline: evaluation of the neck mass in adults // *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2017. Vol. 157, N 2, Suppl. P. S1–S30. doi: 10.1177/0194599817722550
4. Mannelli G., Cecconi L., Gallo O. Laryngeal preneoplastic lesions and cancer: challenging diagnosis. Qualitative literature review and meta-analysis // *Critical Reviews in Oncology/Hematology*. 2016. Vol. 106. P. 64–90. doi: 10.1016/j.critrevonc.2016.07.004
5. Hinthner A., Samson N., Lau H., et al. Volumetric changes in pharyngeal structures following head and neck cancer chemoradiation therapy // *The Laryngoscope*. 2020. Vol. 130, N 3. P. 597–602. doi: 10.1002/lary.28164
6. Baxi S.S., Dunn L.A., Burtneess B.A. Amidst the excitement: A cautionary tale of immunotherapy, pseudoprogression and head and neck squamous cell carcinoma // *Oral Oncology*. 2016. Vol. 62. P. 147–148. doi: 10.1016/j.oraloncology.2016.10.007
7. Szturcz P., Vermorken J.B. Immunotherapy in head and neck cancer: aiming at EXTREME precision // *BMC Med*. 2017. Vol. 15, N 1. P. 110. doi: 10.1186/s12916-017-0879-4
8. Abgral R., Querellou S., Potard G., et al. Does 18f-fdg pet/ct improve the detection of posttreatment recurrence of head and neck squamous cell carcinoma in patients negative for disease on clinical follow-up? // *Journal of Nuclear Medicine*. 2008. Vol. 50, N 1. P. 24–29. doi: 10.2967/jnumed.108.055806
9. Greven KM, Williams DW, Keyes JW, et al. Positron emission tomography of patients with head and neck carcinoma before and after high dose irradiation // *Cancer*. 1994. Vol. 74, N 4. P. 1355–1359. doi: 10.1002/1097-0142(19940815)74:4<1355::aid-cnrcr2820740428>3.0.co;2-i
10. Widmann G., Henninger B., Kremser C., Jaschke W. MRI sequences in head & neck radiology – state of the art // *Fortschr Röntgenstr.* 2017. Vol. 189, N 5. P. 413–422. doi: 10.1055/s-0043-103280
11. Dai Y.L., King A.D. State of the art MRI in head and neck cancer // *Clinical Radiology*. 2018. Vol. 73, N 1. P. 45–59. doi: 10.1016/j.crad.2017.05.020
12. Genant H.K., Boyd D. Quantitative bone mineral analysis using dual energy computed tomography // *Investigative Radiology*. 1977. Vol. 12, N 6. P. 545–551. doi: 10.1097/00004424-197711000-00015
13. Raymakers J.A., Hoekstra O., van Putten J., et al. Fracture prevalence and bone mineral mass in osteoporosis measured with computed tomography and dual energy photon absorptiometry // *Skeletal Radiol*. 1986. Vol. 15, N 3. P. 191–197. doi: 10.1007/BF00354059
14. Tawfik A.M., Kerl J.M., Razek A.A., et al. Image quality and radiation dose of dual-energy CT of the head and neck compared with a standard 120-kVp acquisition // *AJNR Am J Neuroradiol*. 2011. Vol. 32, N 11. P. 1994–1999. doi: 10.3174/ajnr.A2654
15. Deng K., Liu C., Ma R., et al. Clinical evaluation of dual-energy bone removal in CT angiography of the head and neck: comparison with conventional bone-subtraction CT angiography // *Clinical Radiology*. 2009. Vol. 64, N 5. P. 534–541. doi: 10.1016/j.crad.2009.01.007
16. Lell M.M., Kramer M., Klotz E., et al. Carotid computed tomography angiography with automated bone suppression: a comparative study between dual energy and bone subtraction techniques // *Investigative Radiology*. 2009. Vol. 44, N 6. P. 322–328. doi: 10.1097/RLI.0b013e31819e8ad9
17. Thomas C., Korn A., Krauss B., et al. Automatic bone and plaque removal using dual energy CT for head and neck angiography: Feasibility and initial performance evaluation // *European Journal of Radiology*. 2010. Vol. 76, N 1. P. 61–67. doi: 10.1016/j.ejrad.2009.05.004
18. Lell M.M., Hinkmann F., Nkenke E., et al. Dual energy CTA of the supraaortic arteries: Technical improvements with a novel dual source CT system // *European Journal of Radiology*. 2010. Vol. 76, N 2. P. e6–e12. doi: 10.1016/j.ejrad.2009.09.022
19. Chen Y., Xue H., Liu W., et al. [Dual-energy computed tomographic angiography of head and neck arteries with different contrast material doses in second generation dual-source computed tomography system] // *Zhongguo Yi Xue Ke Xue Yuan Xue Bao*. 2010. Vol. 32, N 6. P. 628–633. doi: 10.3881/j.issn.1000.503X.2010.06.008
20. Korn A., Fenchel M., Bender B., et al. High-pitch dual-source CT angiography of supra-aortic arteries: assessment of image quality

- and radiation dose // *Neuroradiology*. 2013. Vol. 55, N 4. P. 423–430. doi: 10.1007/s00234-012-1120-y
21. Chen Y., Xue H., Jin Z., et al. 128-slice accelerated-pitch dual energy ct angiography of the head and neck: comparison of different low contrast medium volumes // *PLoS ONE*. 2013. Vol. 8, N 11. P. e80939. doi: 10.1371/journal.pone.0080939
 22. Korn A., Bender B., Schabel C., et al. Dual-source dual-energy ct angiography of the supra-aortic arteries with tin filter // *Academic Radiology*. 2015. Vol. 22, N 6. P. 708–713. doi: 10.1016/j.acra.2015.01.016
 23. Kaemmerer N., Brand M., Hammon M., et al. Dual-energy computed tomography angiography of the head and neck with single-source computed tomography: a new technical (Split filter) approach for bone removal // *Invest Radiol*. 2016. Vol. 51, N 10. P. 618–623. doi: 10.1097/RLI.0000000000000290
 24. Ma G., Yu Y., Duan H., et al. Subtraction CT angiography in head and neck with low radiation and contrast dose dual-energy spectral CT using rapid kV-switching technique // *BJR*. 2018. P. 20170631. doi: 10.1259/bjr.20170631
 25. Wu Q., Shi D., Cheng T., et al. Improved display of cervical intervertebral discs on water (Iodine) images: incidental findings from single-source dual-energy CT angiography of head and neck arteries // *Eur Radiol*. 2019. Vol. 29, N 1. P. 153–160. doi: 10.1007/s00330-018-5603-z
 26. Schwahofer A., Bär E., Kuchenbecker S., et al. The application of metal artifact reduction (MAR) in CT scans for radiation oncology by monoenergetic extrapolation with a DECT scanner // *Zeitschrift für Medizinische Physik*. 2015. Vol. 25, N 4. P. 314–325. doi: 10.1016/j.zemedi.2015.05.004
 27. Weiß J., Schabel C., Bongers M., et al. Impact of iterative metal artifact reduction on diagnostic image quality in patients with dental hardware // *Acta Radiol*. 2017. Vol. 58, N 3. P. 279–285. doi: 10.1177/0284185116646144
 28. Große Hokamp N., Laukamp K.R., Lennartz S., et al. Artifact reduction from dental implants using virtual monoenergetic reconstructions from novel spectral detector CT // *European Journal of Radiology*. 2018. Vol. 104. P. 136–142. doi: 10.1016/j.ejrad.2018.04.018
 29. Nair J.R., DeBlois F., Ong T., et al. Dual-energy ct: balance between iodine attenuation and artifact reduction for the evaluation of head and neck cancer // *Journal of Computer Assisted Tomography*. 2017. Vol. 41, N 6. P. 931–936. doi: 10.1097/RCT.0000000000000617
 30. Liao E., Srinivasan A. Applications of dual-energy computed tomography for artifact reduction in the head, neck, and spine // *Neuroimaging Clinics of North America*. 2017. Vol. 27, N 3. P. 489–497. doi: 10.1016/j.nic.2017.04.004
 31. Vogt T.J., Schulz B., Bauer R.W., et al. Dual-energy ct applications in head and neck imaging // *American Journal of Roentgenology*. 2012. Vol. 199, N 5, Suppl. P. S34–S39. doi: 10.2214/AJR.12.9113
 32. Srinivasan A., Parker R.A., Manjunathan A., et al. Differentiation of benign and malignant neck pathologies: preliminary experience using spectral computed tomography // *Journal of Computer Assisted Tomography*. 2013. Vol. 37, N 5. P. 666–672. doi: 10.1097/RCT.0b013e3182976365
 33. Tawfik A.M., Razek A.A., Kerl J.M., et al. Comparison of dual-energy CT-derived iodine content and iodine overlay of normal, inflammatory and metastatic squamous cell carcinoma cervical lymph nodes // *Eur Radiol*. 2014. Vol. 24, N 3. P. 574–580. doi: 10.1007/s00330-013-3035-3
 34. Kuno H., Onaya H., Fujii S., et al. Primary staging of laryngeal and hypopharyngeal cancer: CT, MR imaging and dual-energy CT // *European Journal of Radiology*. 2014. Vol. 83, N 1. P. e23–e35. doi: 10.1016/j.ejrad.2013.10.022
 35. Toepker M., Czerny C., Ringl H., et al. Can dual-energy CT improve the assessment of tumor margins in oral cancer? // *Oral Oncology*. 2014. Vol. 50, N 3. P. 221–227. doi: 10.1016/j.oraloncology.2013.12.001
 36. Ginat D.T., Mayich M., Daftari-Besheli L., Gupta R. Clinical applications of dual-energy CT in head and neck imaging // *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2016. Vol. 273, N 3. P. 547–553. doi: 10.1007/s00405-014-3417-4
 37. Tawfik A.M., Kerl J.M., Bauer R.W., et al. Dual-energy CT of head and neck cancer: average weighting of low- and high-voltage acquisitions to improve lesion delineation and image quality –initial clinical experience // *Investigative Radiology*. 2012. Vol. 47, N 5. P. 306–311. doi: 10.1097/RLI.0b013e31821e3062
 38. Li M., Zheng X., Li J., et al. Dual-energy computed tomography imaging of thyroid nodule specimens: comparison with pathologic findings // *Investigative Radiology*. 2012. Vol. 47, N 1. P. 58–64. doi: 10.1097/RLI.0b013e318229fef3
 39. Kuno H., Onaya H., Iwata R., et al. Evaluation of cartilage invasion by laryngeal and hypopharyngeal squamous cell carcinoma with dual-energy CT // *Radiology*. 2012. Vol. 265, N 2. P. 488–496. doi: 10.1148/radiol.12111719
 40. Forghani R., Levental M., Gupta R., et al. Different spectral hounsfield unit curve and high-energy virtual monochromatic image characteristics of squamous cell carcinoma compared with nonossified thyroid cartilage // *AJNR Am J Neuroradiol*. 2015. Vol. 36, N 6. P. 1194–1200. doi: 10.3174/ajnr.A4253
 41. Kuno H., Sakamaki K., Fujii S., et al. Comparison of MR imaging and dual-energy CT for the evaluation of cartilage invasion by laryngeal and hypopharyngeal squamous cell carcinoma // *AJNR Am J Neuroradiol*. 2018. Vol. 39, N 3. P. 524–531. doi: 10.3174/ajnr.A5530
 42. Wichmann J.L., Kraft J., Nöske E.M., et al. Low-tube-voltage 80-kVp neck CT: evaluation of diagnostic accuracy and interobserver agreement // *AJNR Am J Neuroradiol*. 2014. Vol. 35, N 12. P. 2376–2381. doi: 10.3174/ajnr.A4052
 43. Scholtz J.E., Hüsters K., Kaup M., et al. Non-linear image blending improves visualization of head and neck primary squamous cell carcinoma compared to linear blending in dual-energy CT // *Clinical Radiology*. 2015. Vol. 70, N 2. P. 168–175. doi: 10.1016/j.crad.2014.10.018
 44. Lam S., Gupta R., Levental M., et al. Optimal virtual monochromatic images for evaluation of normal tissues and head and neck cancer using dual-energy CT // *AJNR Am J Neuroradiol*. 2015. Vol. 36, N 8. P. 1518–1524. doi: 10.3174/ajnr.A4314
 45. Wang X., Zhao Y., Wu N., et al. [Application of single-source dual-energy spectral CT in differentiating lymphoma and metastatic lymph nodes in the head and neck] // *Zhonghua Zhong Liu Za Zhi*. 2015. Vol. 37, N 5. P. 361–366.
 46. Fu F., He A., Zhang Y., et al. Dual-energy virtual noncontrast imaging in diagnosis of cervical metastasis lymph nodes // *J Can Res Ther*. 2015. Vol. 11, N 6. P. 202. doi: 10.4103/0973-1482.168185
 47. Forghani R. Advanced dual-energy CT for head and neck cancer imaging // *Expert Review of Anticancer Therapy*. 2015. Vol. 15, N 12. P. 1489–1501. doi: 10.1586/14737140.2015.1108193
 48. Lam S., Gupta R., Kelly H., et al. Multiparametric evaluation of head and neck squamous cell carcinoma using a

single-source dual-energy CT with fast kVp switching: state of the art // *Cancers*. 2015. Vol. 7, N 4. P. 2201–2216. doi: 10.3390/cancers7040886

49. Yamauchi H., Buehler M., Goodsitt M.M., et al. Dual-energy CT-based differentiation of benign posttreatment changes from primary or recurrent malignancy of the head and neck: comparison of spectral hounsfield units at 40 and 70 keV and iodine concentration // *American Journal of Roentgenology*. 2016. Vol. 206, N 3. P. 580–587. doi: 10.2214/AJR.15.14896

50. Yang L., Luo D., Li L., et al. Differentiation of malignant cervical lymphadenopathy by dual-energy CT: a preliminary analysis // *Sci Rep*. 2016. Vol. 6, N 1. P. 31020. doi: 10.1038/srep31020

51. May M.S., Bruegel J., Brand M., et al. Computed tomography of the head and neck region for tumor staging – comparison of dual-source, dual-energy and low-kilovolt, single-energy acquisitions // *Invest Radiol*. 2017. Vol. 52, N 9. P. 522–528. doi: 10.1097/RLI.0000000000000377

52. Forghani R., Kelly H., Yu E., et al. Low-energy virtual monochromatic dual-energy computed tomography images for the evaluation of head and neck squamous cell carcinoma: a study of tumor visibility compared with single-energy computed tomography and user acceptance // *Journal of Computer Assisted Tomography*. 2017. Vol. 41, N 4. P. 565–571. doi: 10.1097/RCT.0000000000000571

53. Forghani R., Kelly H.R., Curtin H.D. Applications of dual-energy computed tomography for the evaluation of head and neck squamous cell carcinoma // *Neuroimaging Clinics of North America*. 2017. Vol. 27, N 3. P. 445–459. doi: 10.1016/j.nic.2017.04.001

54. Pérez-Lara A., Forghani R. Spectral computed tomography // *Magnetic Resonance Imaging Clinics of North America*. 2018. Vol. 26, N 1. P. 1–17. doi: 10.1016/j.mric.2017.08.001

55. Forghani R., Mukherji S.K. Advanced dual-energy CT applications for the evaluation of the soft tissues of the neck // *Clinical Radiology*. 2018. Vol. 73, N 1. P. 70–80. doi: 10.1016/j.crad.2017.04.002

56. Yang L., Luo D., Yi J., et al. Therapy effects of advanced hypopharyngeal and laryngeal squamous cell carcinoma: evaluated using dual-energy CT quantitative parameters // *Sci Rep*. 2018. Vol. 8, N 1. P. 9064. doi: 10.1038/s41598-018-27341-0

57. Ge X., Yu J., Wang Z., et al. Comparative study of dual energy CT iodine imaging and standardized concentrations before and after chemoradiotherapy for esophageal cancer // *BMC Cancer*. 2018. Vol. 18, N 1. P. 1120. doi: 10.1186/s12885-018-5058-2

58. Khademi S., Sarkar S., Shakeri-Zadeh A., et al. Dual-energy CT imaging of nasopharyngeal cancer cells using multifunctional gold nanoparticles // *IET nanobiotechnol*. 2019. Vol. 13, N 9. P. 957–961. doi: 10.1049/iet-nbt.2019.0067

59. Forghani R., Chatterjee A., Reinhold C., et al. Head and neck squamous cell carcinoma: prediction of cervical lymph node metastasis by dual-energy CT texture analysis with machine learning // *Eur Radiol*. 2019. Vol. 29, N 11. P. 6172–6181. doi: 10.1007/s00330-019-06159-y

60. Seidler M., Forghani B., Reinhold C., et al. Dual-energy CT texture analysis with machine learning for the evaluation and characterization of cervical lymphadenopathy // *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 2019. Vol. 17. P. 1009–1015. doi: 10.1016/j.csbj.2019.07.004

REFERENCES

1. Bray F, Ferlay J, Soerjomataram I, et al. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 2018;68(6):394–424. doi: 10.3322/caac.21492

2. Socially significant diseases of the Russian population in 2018. Statistical materials. Moscow; 2019. P. 15–17. (In Russ).

3. Pynnonen MA, Gillespie MB, Roman B, et al. Clinical practice guideline: evaluation of the neck mass in adults. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2017;157(2 Suppl):S1–S30. doi: 10.1177/014599817722550

4. Mannelli G, Cecconi L, Gallo O. Laryngeal preneoplastic lesions and cancer: challenging diagnosis. Qualitative literature review and meta-analysis. *Critical Reviews in Oncology Hematology*. 2016;106:64–90. doi: 10.1016/j.critrevonc.2016.07.004

5. Hinther A, Samson N, Lau H, et al. Volumetric changes in pharyngeal structures following head and neck cancer chemoradiation therapy. *The Laryngoscope*. 2020;130(3):597–602. doi: 10.1002/lary.28164

6. Baxi SS, Dunn LA, Burtneiss BA. Amidst the excitement: A cautionary tale of immunotherapy, pseudoprogression and head and neck squamous cell carcinoma. *Oral Oncology*. 2016;62:147–148. doi: 10.1016/j.oraloncology.2016.10.007

7. Szturz P, Vermorken JB. Immunotherapy in head and neck cancer: aiming at EXTREME precision. *BMC Med*. 2017;15(1):110. doi: 10.1186/s12916-017-0879-4

8. Abgral R, Querellou S, Potard G, et al. Does 18F-FDG PET/CT improve the detection of posttreatment recurrence of head and neck

squamous cell carcinoma in patients negative for disease on clinical follow-up? *Journal of Nuclear Medicine*. 2008;50(1):24–29. doi: 10.2967/jnumed.108.055806

9. Greven KM, Williams DW, Keyes JW, et al. Positron emission tomography of patients with head and neck carcinoma before and after high dose irradiation. *Cancer*. 1994;74(4):1355–1359. doi: 10.1002/1097-0142(19940815)74:4<1355::aid-cnrcr2820740428>3.0.co;2-i

10. Widmann G, Henninger B, Kremser C, Jaschke W. MRI sequences in head & neck radiology – state of the art. *Fortschr Röntgenstr*. 2017;189(05):413–422. doi: 10.1055/s-0043-103280

11. Dai YL, King AD. State of the art MRI in head and neck cancer. *Clinical Radiology*. 2018;73(1):45–59. doi: 10.1016/j.crad.2017.05.020

12. Genant HK, Boyd D. Quantitative bone mineral analysis using dual energy computed tomography. *Investigative Radiology*. 1977;12(6):545–551. doi: 10.1097/00004424-197711000-00015

13. Raymakers JA, Hoekstra O, van Putten J, et al. Fracture prevalence and bone mineral mass in osteoporosis measured with computed tomography and dual energy photon absorptiometry. *Skeletal Radiol*. 1986;15(3):191–197. doi: 10.1007/BF00354059

14. Tawfik AM, Kerl JM, Razek AA, et al. Image quality and radiation dose of dual-energy CT of the head and neck compared with a standard 120-kVp acquisition. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2011;32(11):1994–1999. doi: 10.3174/ajnr.A2654

15. Deng K, Liu C, Ma R, et al. Clinical evaluation of dual-energy bone removal in CT angiography of the head and neck: comparison with conventional bone-subtraction CT angiography. *Clinical Radiology*. 2009;64(5):534–541. doi: 10.1016/j.crad.2009.01.007

16. Lell MM, Kramer M, Klotz E, et al. Carotid computed tomography angiography with automated bone suppression: a comparative study between dual energy and bone subtraction techniques. *Investigative Radiology*. 2009;44(6):322–328. doi: 10.1097/RLI.0b013e31819e8ad9
17. Thomas C, Korn A, Krauss B, et al. Automatic bone and plaque removal using dual energy CT for head and neck angiography: Feasibility and initial performance evaluation. *European Journal of Radiology*. 2010;76(1):61–67. doi: 10.1016/j.ejrad.2009.05.004
18. Lell MM, Hinkmann F, Nkenke E, et al. Dual energy CTA of the supraaortic arteries: Technical improvements with a novel dual source CT system. *European Journal of Radiology*. 2010;76(2):e6–e12. doi: 10.1016/j.ejrad.2009.09.022
19. Chen Y, Xue H, Liu W, et al. [Dual-energy computed tomographic angiography of head and neck arteries with different contrast material doses in second generation dual-source computed tomography system]. *Zhongguo Yi Xue Ke Xue Yuan Xue Bao*. 2010;32(6):628–633. doi: 10.3881/j.issn.1000.503X.2010.06.008
20. Korn A, Fenchel M, Bender B, et al. High-pitch dual-source CT angiography of supra-aortic arteries: assessment of image quality and radiation dose. *Neuroradiology*. 2013;55(4):423–430. doi: 10.1007/s00234-012-1120-y
21. Chen Y, Xue H, Jin Z, et al. 128-slice accelerated-pitch dual energy ct angiography of the head and neck: comparison of different low contrast medium volumes. *PLoS ONE*. 2013;8(11):e80939. doi: 10.1371/journal.pone.0080939
22. Korn A, Bender B, Schabel C, et al. Dual-source dual-energy ct angiography of the supra-aortic arteries with tin filter. *Academic Radiology*. 2015;22(6):708–713. doi: 10.1016/j.acra.2015.01.016
23. Kaemmerer N, Brand M, Hammon M, et al. Dual-energy computed tomography angiography of the head and neck with single-source computed tomography: a new technical (Split filter) approach for bone removal. *Invest Radiol*. 2016;51(10):618–623. doi: 10.1097/RLI.0000000000000290
24. Ma G, Yu Y, Duan H, et al. Subtraction CT angiography in head and neck with low radiation and contrast dose dual-energy spectral CT using rapid kV-switching technique. *BJR*. 2018;20170631. doi: 10.1259/bjr.20170631
25. Wu Q, Shi D, Cheng T, et al. Improved display of cervical intervertebral discs on water (Iodine) images: incidental findings from single-source dual-energy CT angiography of head and neck arteries. *Eur Radiol*. 2019;29(1):153–160. doi: 10.1007/s00330-018-5603-z
26. Schwahofner A, Bär E, Kuchenbecker S, et al. The application of metal artifact reduction (Mar) in CT scans for radiation oncology by monoenergetic extrapolation with a DECT scanner. *Zeitschrift für Medizinische Physik*. 2015;25(4):314–325. doi: 10.1016/j.zemedi.2015.05.004
27. Weiß J, Schabel C, Bongers M, et al. Impact of iterative metal artifact reduction on diagnostic image quality in patients with dental hardware. *Acta Radiol*. 2017;58(3):279–285. doi: 10.1177/0284185116646144
28. Große Hokamp N, Laukamp KR, Lennartz S, et al. Artifact reduction from dental implants using virtual monoenergetic reconstructions from novel spectral detector CT. *European Journal of Radiology*. 2018;104:136–142. doi: 10.1016/j.ejrad.2018.04.018
29. Nair JR, DeBlois F, Ong T, et al. Dual-energy ct: balance between iodine attenuation and artifact reduction for the evaluation of head and neck cancer. *Journal of Computer Assisted Tomography*. 2017;41(6):931–936. doi: 10.1097/RCT.0000000000000617
30. Liao E, Srinivasan A. Applications of dual-energy computed tomography for artifact reduction in the head, neck, and spine. *Neuroimaging Clinics of North America*. 2017;27(3):489–497. doi: 10.1016/j.nic.2017.04.004
31. Vogl TJ, Schulz B, Bauer RW, et al. Dual-energy ct applications in head and neck imaging. *American Journal of Roentgenology*. 2012;199(5 Suppl):S34–S39. doi: 10.2214/AJR.12.9113
32. Srinivasan A, Parker RA, Manjunathan A, et al. Differentiation of benign and malignant neck pathologies: preliminary experience using spectral computed tomography. *Journal of Computer Assisted Tomography*. 2013;37(5):666–672. doi: 10.1097/RCT.0b013e3182976365
33. Tawfik AM, Razek AA, Kerl JM, et al. Comparison of dual-energy CT-derived iodine content and iodine overlay of normal, inflammatory and metastatic squamous cell carcinoma cervical lymph nodes. *Eur Radiol*. 2014;24(3):574–580. doi: 10.1007/s00330-013-3035-3
34. Kuno H, Onaya H, Fujii S, et al. Primary staging of laryngeal and hypopharyngeal cancer: CT, MR imaging and dual-energy CT. *European Journal of Radiology*. 2014;83(1):e23–e35. doi: 10.1016/j.ejrad.2013.10.022
35. Toepker M, Czerny C, Ringl H, et al. Can dual-energy CT improve the assessment of tumor margins in oral cancer? *Oral Oncology*. 2014;50(3):221–227. doi: 10.1016/j.oraloncology.2013.12.001
36. Ginat DT, Mayich M, Daftari-Besheli L, Gupta R. Clinical applications of dual-energy CT in head and neck imaging. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2016;273(3):547–553. doi: 10.1007/s00405-014-3417-4
37. Tawfik AM, Kerl JM, Bauer RW, et al. Dual-energy CT of head and neck cancer: average weighting of low- and high-voltage acquisitions to improve lesion delineation and image quality –initial clinical experience. *Investigative Radiology*. 2012;47(5):306–311. doi: 10.1097/RLI.0b013e31821e3062
38. Li M, Zheng X, Li J, et al. Dual-energy computed tomography imaging of thyroid nodule specimens: comparison with pathologic findings. *Investigative Radiology*. 2012;47(1):58–64. doi: 10.1097/RLI.0b013e318229fef3
39. Kuno H, Onaya H, Iwata R, et al. Evaluation of cartilage invasion by laryngeal and hypopharyngeal squamous cell carcinoma with dual-energy CT. *Radiology*. 2012;265(2):488–496. doi: 10.1148/radiol.12111719
40. Forghani R, Levental M, Gupta R, et al. Different spectral hounsfield unit curve and high-energy virtual monochromatic image characteristics of squamous cell carcinoma compared with nonossified thyroid cartilage. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2015;36(6):1194–1200. doi: 10.3174/ajnr.A4253
41. Kuno H, Sakamaki K, Fujii S, et al. Comparison of MR imaging and dual-energy CT for the evaluation of cartilage invasion by laryngeal and hypopharyngeal squamous cell carcinoma. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2018;39(3):524–531. doi: 10.3174/ajnr.A5530
42. Wichmann JL, Kraft J, Nöske EM, et al. Low-tube-voltage 80-kvp neck ct: evaluation of diagnostic accuracy and interobserver agreement. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2014;35(12):2376–2381. doi: 10.3174/ajnr.A4052
43. Scholtz JE, Hüsters K, Kaup M, et al. Non-linear image blending improves visualization of head and neck primary squamous cell carcinoma compared to linear blending in dual-energy CT. *Clinical Radiology*. 2015;70(2):168–175. doi: 10.1016/j.crad.2014.10.018
44. Lam S, Gupta R, Levental M, et al. Optimal virtual monochromatic images for evaluation of normal tissues and head and neck cancer

using dual-energy CT. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2015;36(8):1518–1524. doi: 10.3174/ajnr.A4314

45. Wang X, Zhao Y, Wu N, et al. [Application of single-source dual-energy spectral CT in differentiating lymphoma and metastatic lymph nodes in the head and neck]. *Zhonghua Zhong Liu Za Zhi.* 2015;37(5):361–366.

46. Fu F, He A, Zhang Y, et al. Dual-energy virtual noncontrast imaging in diagnosis of cervical metastasis lymph nodes. *J Can Res Ther.* 2015;11(6):202. doi: 10.4103/0973-1482.168185

47. Forghani R. Advanced dual-energy CT for head and neck cancer imaging. *Expert Review of Anticancer Therapy.* 2015;15(12):1489–1501. doi: 10.1586/14737140.2015.1108193

48. Lam S, Gupta R, Kelly H, et al. Multiparametric evaluation of head and neck squamous cell carcinoma using a single-source dual-energy CT with fast kVp switching: state of the art. *Cancers.* 2015;7(4):2201–2216. doi: 10.3390/cancers7040886

49. Yamauchi H, Buehler M, Goodsitt MM, et al. Dual-energy CT-based differentiation of benign posttreatment changes from primary or recurrent malignancy of the head and neck: comparison of spectral hounsfield units at 40 and 70 keV and iodine concentration. *American Journal of Roentgenology.* 2016;206(3):580–587. doi: 10.2214/AJR.15.14896

50. Yang L, Luo D, Li L, et al. Differentiation of malignant cervical lymphadenopathy by dual-energy CT: a preliminary analysis. *Sci Rep.* 2016;6(1):31020. doi: 10.1038/srep31020

51. May MS, Bruegel J, Brand M, et al. Computed tomography of the head and neck region for tumor staging – comparison of dual-source, dual-energy and low-kilovolt, single-energy acquisitions. *Invest Radiol.* 2017;52(9):522–528. doi: 10.1097/RLI.0000000000000377

52. Forghani R, Kelly H, Yu E, et al. Low-energy virtual monochromatic dual-energy computed tomography images for the evaluation of head and neck squamous cell carcinoma: a study of tumor visibility compared with single-energy computed tomography

and user acceptance. *Journal of Computer Assisted Tomography.* 2017;41(4):565–571. doi: 10.1097/RCT.0000000000000571

53. Forghani R, Kelly HR, Curtin HD. Applications of dual-energy computed tomography for the evaluation of head and neck squamous cell carcinoma. *Neuroimaging Clinics of North America.* 2017;27(3):445–459. doi: 10.1016/j.nic.2017.04.001

54. Pérez-Lara A, Forghani R. Spectral computed tomography. *Magnetic Resonance Imaging Clinics of North America.* 2018;26(1):1–17. doi: 10.1016/j.mric.2017.08.001

55. Forghani R, Mukherji SK. Advanced dual-energy CT applications for the evaluation of the soft tissues of the neck. *Clinical Radiology.* 2018;73(1):70–80. doi: 10.1016/j.crad.2017.04.002

56. Yang L, Luo D, Yi J, et al. Therapy effects of advanced hypopharyngeal and laryngeal squamous cell carcinoma: evaluated using dual-energy CT quantitative parameters. *Sci Rep.* 2018;8(1):9064. doi: 10.1038/s41598-018-27341-0

57. Ge X, Yu J, Wang Z, et al. Comparative study of dual energy CT iodine imaging and standardized concentrations before and after chemoradiotherapy for esophageal cancer. *BMC Cancer.* 2018;18(1):1120. doi: 10.1186/s12885-018-5058-2

58. Khademi S, Sarkar S, Shakeri-Zadeh A, et al. Dual-energy CT imaging of nasopharyngeal cancer cells using multifunctional gold nanoparticles. *IET nanobiotechnol.* 2019;13(9):957–961. doi: 10.1049/iet-nbt.2019.0067

59. Forghani R, Chatterjee A, Reinhold C, et al. Head and neck squamous cell carcinoma: prediction of cervical lymph node metastasis by dual-energy CT texture analysis with machine learning. *Eur Radiol.* 2019;29(11):6172–6181. doi: 10.1007/s00330-019-06159-y

60. Seidler M, Forghani B, Reinhold C, et al. Dual-energy CT texture analysis with machine learning for the evaluation and characterization of cervical lymphadenopathy. *Computational and Structural Biotechnology Journal.* 2019;17:1009–1015. doi: 10.1016/j.csbj.2019.07.004

ОБ АВТОРАХ

* **Петровичев Виктор Сергеевич**, к.м.н.;

адрес: Россия, 125367, Москва, Ивановское шоссе, д. 3;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8391-2771>;

eLibrary SPIN: 7730-7420; e-mail: petrovi4ev@gmail.com

Неклюдова Марина Викторовна, к.м.н.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4224-2975>;

eLibrary SPIN: 7450-6800; e-mail: mneklyudova@med-rf.ru

Синицын Валентин Евгеньевич, д.м.н., профессор;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>;

eLibrary SPIN: 8449-6590; e-mail: vsini@mail.ru

Никитин Игорь Геннадиевич, д.м.н., профессор;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1699-0881>;

eLibrary SPIN: 3595-1990; e-mail: igor.nikitin.64@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Victor S. Petrovichev**, MD, Cand. Sci. (Med.);

address: 3 Ivan'kovskoe shosse, 125367, Moscow, Russia;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8391-2771>;

eLibrary SPIN: 7730-7420; e-mail: petrovi4ev@gmail.com

Marina V. Neklyudova, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4224-2975>;

eLibrary SPIN: 7450-6800; e-mail: mneklyudova@med-rf.ru

Valentin E. Sinitsyn, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>;

eLibrary SPIN: 8449-6590; e-mail: vsini@mail.ru

Igor G. Nikitin, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1699-0881>;

eLibrary SPIN: 3595-1990; e-mail: igor.nikitin.64@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author