

Doi: 10.52341/20738080_2025_137_4_61

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗМЕРЕНИЮ ОБЪЕМА КАМНЯ У ПАЦИЕНТОВ С МОЧЕКАМЕННОЙ БОЛЕЗНЬЮ (ПО ДАННЫМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ)



ВАРЮХИНА Д. А.,
аспирант, ассистент кафедры
лучевой диагностики имени

профессора Н.Е. Штерна ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского» Минздрава России, das4118@yandex.ru



ЧЕХОНАЦКАЯ М. Л.,
д.м.н., профессор, заведующая кафедрой лучевой диагностики имени профессора Н.Е. Штерна ФГБОУ ВО «Саратовский государственный

медицинский университет имени В.И. Разумовского» Минздрава России, заслуженный врач Российской Федерации, fax-1@yandex.ru



РОССОЛОВСКИЙ А. Н.,
д.м.н., доцент кафедры урологии ФГБОУ ВО «Саратовский

государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского» Минздрава России, rossol@list.ru



КОНДРАТЬЕВА О. А.,
к.м.н., доцент кафедры лучевой диагностики имени профессора Н.Е. Штерна ФГБОУ

ВО «Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского» Минздрава России, okondr7@gmail.com



ЧЕХОНАЦКИЙ И. А.,
к.м.н., ассистент кафедры урологии и хирургической андрологии ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, iyae.dev@gmail.com

сая медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, iyae.dev@gmail.com

Стандартные МСКТ-критерии конкремента – такие, как локализация, размер и плотность, – широко используются для предоперационной неинвазивной оценки и дифференцированного подхода к выбору тактики хирургического лечения уролитиаза. В настоящем исследовании рассматриваются альтернативный МСКТ-параметр, объем камня и его прогностическая ценность в качестве предиктора эффективности элиминации конкрементов у пациентов с мочекаменной болезнью.

Ключевые слова: нефролитиаз, уролитиаз, объем, камень, компьютерная томография.

MODERN APPROACHES TO MEASURING STONE VOLUME IN PATIENTS WITH UROLITHIASIS (ACCORDING TO COMPUTED TOMOGRAPHY)

Varyukhina D., Chekhonatskaya M., Rossolovskiy A., Kondratyeva O., Chekhonatskiy I.

The standard criteria of calculus in multi-spiral computed tomography – such as localization, size and density – are widely used for preliminary non-invasive assessment and differentiated approach to selection of the tactics for the surgical treatment of urolithiasis. In this review an alternative parameter of multispiral computed tomography – stone volume – is examined and its prognostic value is assessed as a predictor of the efficiency of calculus elimination in patients with urolithiasis.

Key words: nephrolithiasis, urolithiasis, volume, stone, computed tomography.

Введение

Мочекаменная болезнь (МКБ) является одной из наиболее распространенных патологий в урологии. По данным *J. Lang et al.*, распространенность МКБ в мире достигает 13% и имеет тенденцию к постоянному росту [1].

В России почти каждому второму пациенту с уролитиазом требуется оперативное вмешательство, при этом наиболее распространенными являются эндоскопические методы [2]. В соответствии с зарубежными руководствами по МКБ и клиническими рекомендациями Минздрава России выбор хирургической тактики лечения МКБ зависит от размера камня [3, 4]. Мульти-спиральная компьютерная томография (МСКТ) органов забрюшинного пространства (ОЗП), широко признанная как «золотой стандарт» диагностики уролитиаза, позволяет на предоперационном этапе оценить морфометрические параметры конкремента, влияющие на эффективность планируемого оперативного вмешательства [3, 4, 5]. Однако двумерные измерения (максимальный размер конкремента и площадь его поверхности) недостаточно точно отражают общую каменную массу, поскольку уролиты чаще характеризуются неправильной трехмерной геометрической формой [6, 7]. Так, при сопоставлении результатов волюметрии двух конкрементов с эквивалентными максимальными диаметрами (например, размерами 20×20×20 мм и 20×5×5 мм) разница составляет 16 раз (4189 мм³ и 262 мм³ соответственно) [8].

Цели исследования

Проанализировать сведения из литературных источников, предлагающих различные варианты измерения объема нефро- и уролитов (по данным МСКТ), а также определить прогностическое значение данного параметра в качестве предиктора эффективности элиминации конкрементов у пациентов с МКБ.

Материалы и методы

Проанализированы 25 русско- и англоязычных источников в базах PubMed, Научной электронной библиотеки (eLibrary.ru), Google Scholar с 2009 по 2024 г., так как основной массив исследований, посвященный изучаемому вопросу, был проведен именно в этот период времени.

Результаты

Помимо определения литоразмеров ряд исследований обращает внимание на сопутствующий доступный для КТ-оценки параметр камня – его объем. Расчет этого стереоскопического критерия является одним из потенциальных прогностических факторов успешности элиминации конкрементов. *М. Kobayashi et al.* (2022) оценили влияние объема нефролита на достижение состояния полного освобождения почки от камней (Stone Free Rate, или SFR) у 193 пациентов, которые были подвергнуты дистанционной ударно-волновой литотрипсии (ДУВЛ). Исследователи установили, что объем конкремента достоверно влиял на SFR (AUC=0,729), при этом его значения более 290 мм³ являлись отрицательным предиктором эффективности лечения [9].

В работе *T. Umemo et al.* (2022) было доказано, что объем нефролита являлся значимым КТ-параметром достижения состояния SFR после перкутанной нефролитотрипсии: площадь под кривой (AUC) – 0,701. Авторы обратили внимание, что повторное хирургическое вмешательство требовалось пациентам с конкрементами >15 000 мм³ [10].

Еще одно исследование, подтвердившее прогностическую ценность литоволюметрии как предиктора полного освобождения ренальной полостной системы от камней после выполнения ретроградной интратенальной хирургии, было выполнено *С.М. Yazici et al.* (2024). В данном эксперименте было проведено сравнение зависимости достижения SFR от размерных и объемных характеристик конкремента на нативных КТ-сканах 1128 больных. Объем конкремента был определен специалистами по формуле трехосного эллипсоида (см. табл.), его размер – по наибольшему диаметру в одной из трех проекций. Авторами было установлено, что оба вышеперечисленных параметра нефролита являлись статистически достоверными предикторами SFR. При попарном сравнении объем камня обладал более высокой прогностической ценностью в успешности планируемого

Формулы расчета объема конкрементов мочевыделительной системы

Название	Математическое выражение
Объем трехосного эллипсоида	$\pi \times a \times b \times c \times 0,167$
Объем вытянутого эллипсоида вращения	$\pi \times a \times b \times b \times 0,167$
Объем сплюснутого эллипсоида вращения	$\pi \times a \times a \times c \times 0,167$
Объем сферы	$4/3 \times \pi \times \text{radius}^3$
Формула Аккермана	$0,6 \times \pi \times \text{radius}^2$
Формула Zorba O.Ü.	$a \times b \times c \times 0,52$

Примечания: а – длина, b – ширина, с – высота конкремента.

оперативного вмешательства ($p < 0,001$), чем его размер [11].

Расчет объема конкремента по формулам

Дискутабельным остается вопрос выбора оптимального математического выражения для измерения объема камня. Наиболее часто применяется формула объема эллипсоида (см. табл.), рекомендованная Европейской ассоциацией урологов [7]. При наибольшем диаметре камня менее 15 мм его объем, рассчитанный по предложенной формуле, может быть завышен. При наибольшем диаметре камня до 9 мм волюметрия предпочтительна по формуле объема вытянутого эллипсоида вращения, а при наибольшем диаметре от 9 до 15 мм – сплюснутого эллипсоида вращения [7].

Предложено еще несколько формул для измерения объема камней мочевыделительной системы: объема сферы, Аккермана, кумуляции (суммы наибольших диаметров каждого конкремента) [12]. *O. Merigot de Treigny et al.* (2015) сравнили диагностическую точность трех вышеперечисленных вариантов волюметрии конкрементов в достижении SFR после ретроградной интратрениальной хирургии по поводу МКБ. Измерения объема конкрементов по формулам объема сферы ($p=0,016$), Аккермана ($p=0,018$), кумуляции ($p=0,0076$) достоверно определяли успешность ретроградной интратрениальной хирургии камней < 20 мм. При большем размере конкрементов статистически значимыми предикторами SFR были расчеты по формулам кумуляции и Аккермана [13].

Напротив, в исследовании *H. Ito et al.* (2013) не было отмечено корреляционного взаимодействия между литоволюметрией по формуле кумуляции и эффективности уретероскопической лазерной литотрипсии [14].

В работе *O.Ū. Zorba et al.* (2016) была продемонстрирована важная роль мануальной волюметрии уролитов в качестве прогностического фактора их самопроизвольного отхождения у пациентов с почечной коликой. Были проанализированы результаты нативной МСКТ ОЗП у 78 пациентов с конкрементами в мочеточниках. Исследователи в течение 1 мес. еженедельно оценивали отхождение уролитов по данным ультразвукового исследования почек, мочеточников, мочевого пузыря и рентгенографии органов брюшной полости (ОБП). Объемы камней были определены по предложенному авторами математическому вы-

ражению (см. табл.). Стереоскопический параметр уролита являлся точным предиктором самопроизвольного отхождения камней размером более 7 мм ($p=0,009$) [15].

N.A. Heidar et al. в 2022 г. ретроспективно проанализировали результаты бесконтрастной МСКТ ОЗП 450 чел. с одиночным камнем мочеточника размером ≤ 10 мм. Литоволюметрия осуществлялась врачом-рентгенологом по формуле объема трехосного эллипсоида (см. табл.). Авторы сообщили, что объем камня обладал более высокой прогностической ценностью в отношении спонтанного отхождения конкремента мочеточника, чем определение его максимального диаметра: показатель AUC составлял 0,894 и 0,847 соответственно. При увеличении объема уролита на 1 мм^3 вероятность его спонтанного отхождения уменьшалась на 2,5% [16].

Определение объема камня полуавтоматическими способами

Первые публикации о применении полуавтоматических методов волюметрии конкрементов у пациентов с МКБ появились еще в начале XXI в. В 2009 г. *G. Bandi et al.* проанализировали результаты МСКТ-исследований и лечения больных ($n=94$) с одиночными камнями верхних мочевыводящих путей размером 4–20 мм. Специалисты выделяли контуры уро- и нефролитов на каждом изображении КТ-скана. Программное обеспечение суммировало эти данные и создавало трехмерную реконструкцию конкремента с подсчетом его объема. Объем камня был достоверно ассоциирован с SFR после ДУВЛ (отношение шансов [ОШ] 1,004, 95% ДИ 1,002–1,006; $p < 0,001$). Резидуальные фрагменты отмечены во всех случаях дезинтеграции конкрементов объемом более 800 мм^3 у 73% и 28% пациентов с конкрементами $> 500 \text{ мм}^3$ и $< 500 \text{ мм}^3$ соответственно [17].

В своей работе *V. Zumstein et al.* (2017) применили метод сегментации предоперационных КТ-изображений ОЗП больных уролитоазом. Волюметрия камня была выполнена объемным рендерингом (3D Slicer Version 4.2.1). Авторы сообщили об эффективности и эргономичности полуавтоматической технологии определения стереоскопической характеристики уролитов. Кроме этого, исследователи подчеркнули важность измерения объема конкремента, а не его двумерных КТ-параметров: результаты волюметрии равнозначных по максимальному диаметру камней отличались более чем на 19% [6].

L. Canat et al. (2019) сопоставили диагностическую точность расчета объемов нефролитической сегментации и по формуле трехосного эллипсоида (см. табл.) с методом погружения напечатанных 3D-моделей конкрементов в воду. Результаты объемного рендеринга (Dornheim Segmenter Analyzer) DICOM-файлов МСКТ ОБП 27 чел. с нефролитиазом были использованы для печати трехмерных моделей камней. Исследователи рассматривали метод погружения 3D-моделей нефролитов в воду как эталонный способ волюметрии. По сравнению с последним, в измерении объема камней сегментация была точнее ($p=0,051$), чем расчет по формуле трехосного эллипсоида ($p<0,0001$) [18]. Подобные результаты были продемонстрированы R. Jain et al. (2018). Коэффициент корреляции между волюметрией литомоделей из полимерной глины методом их погружения в воду и определением объема 3D-сегментацией, по сравнению с измерением по формуле трехосного эллипсоида, составил 0,993 (95% ДИ 0,990–0,995) и 0,819 (95% ДИ 0,775–0,863) соответственно. При мануальном математическом измерении наблюдалась тенденция к преувеличиванию объемов конкрементов более $1,5 \text{ см}^3$ [19].

H.W. Cui et al. (2020) оценили возможность текстурного анализа компьютерных томограмм в волюметрии камней почечной локализации для оценки эффективности ударно-волнового лечения. Авторы сравнили диагностическую точность расчета объема конкрементов по математическим формулам и полуавтоматически. С этой целью были изучены нативные пред- и послеоперационные КТ-исследования ОЗП у 72 пациентов. Определялись максимальные размеры нефролитов в трех взаимно перпендикулярных плоскостях: учитывалось наибольшее полученное значение. Объем камня рассчитывался по формулам трехосного эллипсоида, вытянутого и сплюснутого эллипсоидов вращения (см. табл.). Программное обеспечение для текстурного анализа КТ-данных (StoneChecker Software Limited) подсчитывало количество пикселей в обозначенной специалистами зоне интереса (Region Of Interest, ROI) и умножало на размер пикселя и толщину среза, таким образом измеряя литообъем. Результаты исследования продемонстрировали сопоставимую диагностическую точность волюметрии камней в почках врачом «вручную» полуавтоматическим способом ($r>0,8$). Авторами отмечена высокая положительная корреляционная связь между расчетом объема нефролита с помощью программного обеспече-

ния и по формулам сплюснутого эллипсоида вращения ($r=0,94$) или трехосного эллипсоида ($r=0,94$). Среди морфометрических КТ-параметров волюметрия конкремента (коэффициент R2 Nagelkerke=0,217) являлась более статистически значимым критерием для SFR после ДУВЛ, чем определение его максимального размера ($0,09<$ коэффициент R2 Nagelkerke $<0,1$) или площади (коэффициент R2 Nagelkerke =0,156) [20].

В пилотном исследовании F. Panthier et al. (2021) сообщили о применении программного обеспечения («Kidney Stone Calculator») для предоперационного планирования эндоскопического лечения нефролитиаза, рассчитывающего объем камня и предполагаемую продолжительность лазерной литотрипсии. Программа измеряет стереоскопические литохарактеристики путем сегментации бесконтрастных КТ-сканов в формате DICOM. Пользователю необходимо самостоятельно определить область интереса (ROI), задать диапазон от минимального до максимального значения плотности (HU) нефролита. Авторы пришли к выводу, что форма, размер или состав камня не влияют на воспроизводимость волюметрии. Результаты полуавтоматического измерения объема нефролитов, полученные тремя специалистами независимо друг от друга, были сопоставимы ($r=0,99$, коэффициент конкордации Кендалла [W]=0,98). Следует отметить, что дизайн исследования F. Panthier et al. включал малое количество клинических случаев ($n=2$), при анализе которых наблюдалась максимальная разница (15%) в определении литообъемов экспертами [21].

В работе А. Peyrottes et al. (2023) продемонстрированы диагностическая точность и воспроизводимость расчета объема камней с помощью «Kidney Stone Calculator» в клинической практике. Из многоцентровой базы данных были отобраны результаты МСКТ ОЗП 50 пациентов с одиночными или множественными нефролитами переменного размера, положения и состава. Три специалиста определяли объем конкремента программным обеспечением «Kidney Stone Calculator», при этом каждый из них повторял измерение по 5 раз. Воспроизводимость результатов при волюметрии одним оператором была высокой: показатель W составлял от 0,98 до 1 ($p<0,0001$). Авторы отметили почти полную согласованность оценки стереоскопического литопараметра тремя специалистами ($W=0,99$, $p<0,0001$). При сегментации конкрементов, локализованных в лоханке и, как минимум, в одной чашечке или располагающихся в несколь-

ких полостей собирающей системы почки, результатам измерения операторами объема камней варьировались. Резюмируя вышесказанное, исследователи отметили, что волюметрия сложных нефролитов с помощью «Kidney Stone Calculator» менее точна и воспроизводима, чем одиночных камней лоханки или чашечки [22].

По мнению *T. Chiou et al.* (2023), стереоскопическая характеристика камня могла иметь значимое предиктивное влияние на самопроизвольное отхождение конкрементов у пациентов с почечной коликой. Ретроспективно были проанализированы результаты КТ ОБП больных ($n=172$) с одиночным камнем почки или мочеточника. Для волюметрии было использовано программное обеспечение («quantitative Stone Analysis Software»), полуавтоматически идентифицирующее конкремент на основе мануального очерчивания врачом его контуров на одном или нескольких изображениях КТ-срезов. Проведенный ROC-анализ показал, что объем камня демонстрирует более высокую надежность в качестве прогностического критерия его самопроизвольного отхождения спустя 2, 4 или 6 недель от приступа почечной колики, по сравнению с автоматическим и «мануальным» определением наибольшего литоразмера: показатель AUC составлял 0,88, 0,93 и 0,92 соответственно [23].

Обсуждение

Результаты исследований свидетельствуют, что предоперационная литоволюметрия может дать дополнительные прогностические возможности при оценке достижения SFR после применения малоинвазивных методов лечения МКБ [9–11, 17, 20]. Стереоскопическая характеристика камня может рассматриваться в качестве КТ-предиктора его самопроизвольного отхождения у пациентов с почечной коликой [15, 23].

Для калькуляции объема камней было предложено несколько формул (см. табл.), из которых наиболее широкое распространение получила формула объема трехосного эллипсоида [7, 11–16]. Однако, несмотря на доступность и простоту применения, мануальная волюметрия имеет ряд ограничений. Во-первых, определение объема сопряжено с увеличением временных затрат в работе специалиста: необходимо измерить высоту, ширину и длину конкремента, произвести математические вычисления. Стоит отметить, что оценка литопараметров субъективна, зависит от опыта и навыка врача. Во-вторых,

размеры камня могут значительно варьироваться в связи с параметрами сканирования, используемого окна визуализации. В-третьих, мануальная волюметрия конкрементов не учитывает индивидуальные особенности геометрии уро- и нефролитов, что может исказить их реальный объем.

Относительно новой методикой, позволяющей оценить объем камня, но лишенной недостатков его «ручной» калькуляции, является применение полуавтоматических способов [17–23]. Результаты литоволюметрии, определенные сегментацией или программным обеспечением, превосходят по точности мануальные измерения. Данные способы позволяют измерить объем камня быстрее, чем при его расчете по формулам. Полуавтоматическая волюметрия нивелирует субоптимальную воспроизводимость оценки литообъема оператором. В практической деятельности измерение объема камня полуавтоматическими методами лимитировано малой доступностью программного обеспечения.

Стоит подчеркнуть необходимость проведения клинической апробации предложенных методов волюметрии нефро- или уролитов для разработки единых требований и порядка их применения для оценки литообъема.

Заключение

Учитывая высокий диагностический и прогностический потенциалы литоволюметрии при планировании хирургического лечения МКБ или определении риска самостоятельного отхождения конкрементов при почечной колике, актуальным следует считать включение измерения объема камней в дополнение к рутинно анализируемым их МСКТ-параметрам.

Положительные результаты предстоящей клинической апробации методов КТ-литоволюметрии могут быть в последующем внедрены в рекомендации по ведению больных с МКБ.

Перспективным направлением является продолжение активных экспериментальных исследований с целью стандартизации и оптимизации подходов к определению объема камней по данным компьютерно-томографического сканирования.

Литература

