

УДК 616.21-073.756.8
DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-5-71-77

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ, ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ТРЕХМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ В ОТОРИНОЛАРИНГОЛОГИИ
(Обзор литературы)**

Г.О. Миненков, Н.Б. Нуркеев, А.А. Байбориева, Ж.М. Турапова

Аннотация. Рентгеновская компьютерная томография сыграла чрезвычайно важную роль в медицине и теперь занимает центральное место в медицинской визуализации. Компьютерная томография была впервые представлена 30 лет назад и с тех пор стала неотъемлемой частью клинической практики. Из-за быстрого развития технологий немногие врачи осведомлены о возможностях и ограничениях различных типов сканеров. В этом обзоре описываются основные типы компьютерно-томографических сканеров, которые используются в повседневной клинической практике, и обсуждается их использование при исследовании широкого спектра различных состояний. Также высокотехнологичные методы лучевой диагностики заложили фундамент для развития технологии трехмерной печати, которая используется в различных областях медицины и хирургии для улучшения ухода за пациентами и повышения квалификации врачей. Поскольку затраты на внедрение трехмерной печати снизились, использование этой технологии расширилось, особенно в хирургических областях.

Ключевые слова: компьютерная томография; трехмерное моделирование; трехмерная печать.

**ОТОРИНОЛАРИНГОЛОГИЯДА КОМПЬЮТЕРДИК ТОМОГРАФИЯ,
ҮЧ ӨЛЧӨМДҮҮ МОДЕЛДӨӨ ЖАНА ҮЧ ӨЛЧӨМДҮҮ БАСЫП ЧЫГАРУУ
(Адабияттарга сереп салуу)**

Г.О. Миненков, Н.Б. Нуркеев, А.А. Байбориева, Ж.М. Турапова

Аннотация. Рентгендик компьютердик томография медицинада өтө маанилүү роль ойногон жана азыр медициналык сүрөттөө үчүн борбордук орунду ээлейт. Компьютердик томография биринчи жолу 30 жыл мурун киргизилген жана ошондон бери клиникалык практиканын ажырагыс бөлүгү болуп калды. Технологиянын тез өнүгүшүнө байланыштуу, баардык дарыгерлер сканерлердин ар кандай түрлөрүнүн мүмкүнчүлүктөрүн жана чектөөлөрүн биле беришпейт. Бул серептөө кунүмдүк клиникалык практикада колдонулган компьютердик-томографиялык сканерлердин негизги түрлөрүн сүрөттөйт жана алардын ар кандай шарттардын кеңири спектрин изилдөөдө колдонулушун талкуулайт. Ошондой эле радиодиагностиканын жогорку технологиялык ыкмалары медицинанын жана хирургиянын ар түрдүү тармактарында бейтаптарды тейлөөнү жакшыртуу жана дарыгерлердин квалификациясын жогорулатуу үчүн колдонулуучу үч өлчөмдүү басып чыгаруу технологиясын өнүктүрүүгө негиз түздү. Үч өлчөмдүү басып чыгарууну ишке ашырууга кеткен чыгымдар азайгандыктан, бул технологияны колдонуу өзгөчө хирургиялык тармактарда кеңейди.

Түйүндүү сөздөр: компьютердик томография; үч өлчөмдүү моделдөө; үч өлчөмдүү басып чыгаруу.

**COMPUTED TOMOGRAPHY, THREE-DIMENSIONAL MODELING
AND THREE-DIMENSIONAL PRINTING IN OTORHINOLARYNGOLOGY
(Literature review)**

G.O. Minenkov, N.B. Nurkeev, A.A. Baiborieva, Zh.M. Turapova

Abstract. X-ray computed tomography has played an extremely important role in medicine and now it is central to medical imaging. Computed tomography firstly was introduced 30 years ago and has become an integral part of clinical

practice. Due to the rapid development of technology, just few clinicians are aware of the capabilities and limitations of different types of scanners. This review describes the main types of computed tomographic scanners used in everyday clinical practice and discusses their use in examining a wide range of different conditions. Also high-tech methods of radiation diagnostics laid the foundation for the development of three-dimensional printing technology, which is used in various fields of medicine and surgery to improve patient care and improve the skills of doctors. As the costs of three-dimensional printing have come down, the use of this technology has expanded, especially in surgical fields.

Keywords: computed tomography; three-dimensional modeling; three-dimensional printing.

Актуальность. В последние десятилетия были предприняты значительные усилия, чтобы улучшить существующие методы исследования морфологии биологических образцов атравматичным способом. Одним из таких методов является компьютерная томография (КТ), метод, широко используемый для неинвазивной визуализации анатомии человеческого тела.

История КТ. Появление КТ в мире научного сообщества стало одним из величайших открытий в истории. Первый КТ-сканер, который был создан британским инженером Годфри Хаунсфилдом, был установлен в Лондоне в 1971 г. [1]. Начиная с этого периода стали широко развиваться томографические методы диагностики. Технология компьютерной томографии значительно продвинулась в своем развитии. Для первых пошаговых КТ требовалось слишком много времени из-за медленного вращения системы “трубка – детектор”, а огромное компьютерное оборудование создавало сравнительно грубые сканированные изображения. Усовершенствования в технологии трубок и компьютерного оборудования, а также программного обеспечения сократили время сканирования и улучшили разрешение сканирования. Внедрение технологии контактных колец в сканеры в конце 1980-х гг. привело к разработке спиральных КТ-сканеров [2]. Данная технология устранила необходимость в жестком механическом соединении между силовыми кабелями и рентгеновской трубкой. Эта разработка, позволяющая трубке бесконечно вращаться в одном направлении, выдвинула компьютерную томографию в области визуализации на передний план. Пока трубка вращается, стол, поддерживающий пациента, также непрерывно перемещается, так что сканируется объем ткани, а не отдельные срезы.

Спиральная КТ имеет несколько преимуществ. Время сканирования намного короче, чем у обычной компьютерной томографии. Сканы, расположенные близко друг к другу, получаются

в хорошем качестве в разных плоскостях. Пораженную область можно оценивать в определенных фазах прохождения контрастного вещества через сосуды [1]. Появилась методика компьютерно-томографической ангиографии, и в этой связи уменьшается вероятность того, что может остаться незамеченным даже небольшое поражение.

Не менее важным достижением в лучевой диагностике стало появление *многослойной спиральной*, или так называемой *мультиспиральной, компьютерной томографии* (МСКТ) в 1998 г. [3]. В отличие от обычных и спиральных томографов в многослойных вместо одного имеется несколько рядов детекторов для улавливания рентгеновского луча после того, как он прошел через пациента. Увеличенное количество детекторов и время вращения трубки, которое занимает уже доли секунды, способствует более быстрому охвату заданного объема ткани без потери качества изображения. Появилась возможность проследить за движением контрастного вещества по сосудам всех анатомических областей [4]. В 2003–2004 гг. были созданы томографы с 32–64 спиральями, и время оборота трубки составляло у них 0,3 с, что делало такие приборы в действительности объемными томографическими системами. Но для преобладающего большинства клинических применений более чем достаточны сканеры с 4–8–16 рядами детекторов [1, 5].

Благодаря появлению МСКТ, которая позволила за достаточно короткое время производить объемный сбор данных, область применения КТ значительно расширилась. К примеру, стала возможной визуализация практически всех сосудов с помощью КТ-ангиографии. К примеру, при использовании четырехрядного сканера за значительно короткое время можно сканировать несколько отделов организма во время одной задержки дыхания (например, грудная клетка, живот и таз у пациента с травмой за 20 секунд).

В качестве альтернативы, обычный объем данных можно исследовать, используя более мелкие срезы, например, получение срезов размером 1 мм через грудную клетку за 20 секунд, улучшение деталей и облегчение переформатированных изображений лучшего качества [2]. Теоретически время, затрачиваемое на сканирование с помощью мультисрезового сканера с четырьмя детекторами, составляет четверть времени, затрачиваемого на сканирование односрезового спирального сканера. На практике мультисрезовый сканер получает изображения в два-три раза быстрее, чем односрезовый.

Использование мультисрезового сканера значительно увеличит пропускную способность пациентов по сравнению с обычным сканером, но производительность будет аналогична пропускной способности современного спирального сканера. В то же время на практике пропускная способность пациентов ограничена временем, затрачиваемым на визуализацию и реконструкцию этих данных.

В настоящее время большинство исследований с помощью магнитно-резонансной томографии занимает гораздо больше времени, чем спиральное или мультисрезовое сканирование одной и той же области. Компьютерная томография обычно лучше подходит для исследования участков, подверженных движению, таких как легкие и кишечник. Спиральное сканирование позволило разработать *компьютерную томографическую рентгеноскопию*, обеспечивающую визуализацию в реальном времени для процедур вмешательства под контролем компьютерной томографии [6].

Магнитно-резонансная томография играет ограниченную роль у пациентов с серьезными травмами и у пациентов на аппаратах ИВЛ из-за того, что магнитная среда создает проблемы для анестетиков и наблюдения за пациентами. Противопоказания для магнитно-резонансной томографии включают кардиостимуляторы и определенные металлические имплантаты. Большинство аппаратов, выполняющих магнитно-резонансную томографию, сообщают о частоте отказов 3–6 % в связи с клаустрофобией пациентов или неспособности сохранять неподвижность в течение длительного времени сканирования, особенно детьми или пожилыми пациентами [5].

МСКТ с ее скоростью и возможностью многоплоскостного переформатирования может заменить магнитно-резонансную томографию в нескольких клинических ситуациях. Но если магнитно-резонансная томография указывается в качестве исследования первой линии, то это предпочтительнее из-за отсутствия ионизирующего излучения. Незаменимую роль сыграла МСКТ в неотложной диагностике, например, при травмах, переломах костей, нарушениях мозгового кровообращения и других чрезвычайных состояниях [2]. За значительно короткое время данный метод позволяет установить правильный предварительный диагноз или сократить диапазон диагностического поиска, что может заменить целую группу методов диагностики.

Компьютерная томография, в свою очередь, включает запись двумерных рентгеновских изображений под разными углами вокруг объекта с последующей цифровой трехмерной (3D) реконструкцией. Результирующий трехмерный объем не только позволяет проводить разнонаправленное исследование интересующей области (например, органа), но также позволяет проводить измерения размеров, объема или другие более сложные измерения [7]. Благодаря появлению МСКТ сегодня спектр различных трехмерных реконструкций огромен.

Трехмерное моделирование и трехмерная печать. Трехмерная печать в последние годы используется в отоларингологии для предоперационного планирования, обучения, протезирования, пересадки и реконструкции. Новые технологии включают в себя печать тканевых каркасов для ушной раковины и носа, более реалистичные обучающие модели и персонализированные имплантируемые медицинские устройства.

Трехмерная печать, которая стала популярной в последние годы с появлением доступных настольных и персональных 3D-принтеров, возникла 36 лет назад как форма технологии быстрого прототипирования в обрабатывающей промышленности. Технология 3D-печати быстро развивается, и о ее возможностях и приложениях сообщается все шире [8, 9]. Эти факторы привели к тому, что технология все чаще применяется в новых областях и для новых целей.

Эта ситуация особенно актуальна в случае медицины и здравоохранения, где 3D-печать применяется для производства новых и заменяемых персонализированных медицинских устройств и имплантатов, моделей для медицинского образования, обучения, симуляции, моделей для медицинских исследований и моделей для дооперационного планирования.

Также другие перспективные области применения, такие как печать замены органов биологическими материалами. Более продвинутой аддитивной природой процесса 3D-печати позволяет создавать формы моделей, которые не могут быть получены с помощью какого-либо другого производственного процесса. Растущее разнообразие технологий печати, например, стереолитография, порошковая наплавка, моделирование наплавленного осаждения [9, 10], идет параллельно с обеспечением широкого разнообразия типов материалов, цветов и физических свойств. Технология достигла стадии обеспечения возможности печати многокомпонентных моделей. Некоторые из этих типов материалов сейчас представляют большой интерес в медицинской области, например, в качестве прямых анатомических заменяемых частей или в качестве фантомов для предоперационного планирования, обучения и образования [10].

Предоперационное планирование. Возможность быстро и точно создавать модели сложных анатомических структур значительно улучшила предоперационное планирование многими хирургами. Вместо того, чтобы полагаться только на двумерные радиологические изображения, теперь возможно создание полномасштабных 3D-копий соответствующих структур с дополнительным преимуществом тактильной обратной связи. Исследования в различных областях уже продемонстрировали полезность 3D-печати для картирования мягких, сосудистых и костных тканей [11]. 3D-моделирование и производство помогают практикующим врачам визуализировать анатомию до операции, отрабатывать методы, предвидеть ошибки, сокращать количество догадок, прогнозировать результаты и минимизировать продолжительность операций [12]. Индивидуальные хирургические шаблоны и оборудование дополнительно оптимизируют оперативное вмешательство.

Например, шаблоны моделей, напечатанные на 3D-принтере, используются для сгибания пластин для реконструкции нижней челюсти в предоперационном периоде, чтобы этот процесс не требовал времени операции под общим наркозом [12]. Реконструкция нижней челюсти представляет большую сложность из-за требований к нагрузке и окклюзии. 3D-печать позволяет точно планировать реконструкцию нижней челюсти, препарировать хирургические имплантаты и изготавливать зубные протезы. Подобные преимущества были отмечены при реконструкциях верхней челюсти, где выравнивание титановых сеток можно проверить по отпечатанным копиям [13]. Еще одна интересная возможность – настраиваемые инструменты для 3D-печати. Например, ларингоскопы, напечатанные на 3D-принтере, позволяют хирургам использовать интраоперационную хирургическую визуализацию для трансоральной хирургии, когда традиционные металлические инструменты запрещают использование МРТ и создают значительные артефакты на КТ [14].

В литературе также описывается использование 3D-печати для предоперационного хирургического обоснования и картирования. В одном примере модель черепа, напечатанная на 3D-принтере, была успешно использована для планирования резекции основания черепа ювенильной носоглоточной ангиофибромой. Другие патологии основания черепа, в частности опухоли, были картированы до операции с помощью 3D-печатных моделей для оценки доступа и воздействия опухоли [15]. В другом исследовании, оценивающем картирование лобной пазухи во время доступа к костно-пластическому лоскуту, 3D-печатные модели использовались в качестве накладок с точностью до 1 мм [16]. Напечатанные на 3D-принтере копии также помогли при планировании технически сложных отоларингологических операций на височной кости у детей [17]. В другом отчете рассказывается о том, как персонализированная копия ушной раковины была напечатана на 3D-принтере из специальной смолы, чтобы помочь в предоперационном планировании реконструкции уха [18].

Наконец, 3D-модели анатомических структур также могут быть полезны для обучения пациентов. Имея возможность визуально

и физически взаимодействовать с этими моделями, пациенты могут лучше понимать патологии и вмешательства без необходимости ориентироваться в сложностях рентгенографической визуализации. Дополнительная легкость и комфорт, связанные с визуально понятной моделью, могут интуитивно помочь в оптимизации процесса хирургического согласия [11].

Хирургическое обучение. 3D-печать может быть интегрирована в систему очного обучения, где часто бывает сложно и неэффективно обучать специальным хирургическим навыкам новичков в операционной. Эта технология позволяет врачам практиковать эти навыки, уменьшая опасность для пациентов за счет использования сложных высокоточных моделей. Височные кости, напечатанные на 3D-принтере, устраняют необходимость в получении и извлечении височных костей от трупных доноров, но ограничения включают сложность воспроизведения костей среднего уха и задержку порошков в воздушных ячейках сосцевидного отростка [19].

Использование обучающих моделей для обучения эндоскопическим методам также имеет большие перспективы. 3D-печатные модели, полученные на основе рентгенографических изображений пациентов, были разработаны для имитации патологий переднего основания черепа, что позволяет стажерам практиковать сверление с помощью эндоназального доступа без риска для пациентов – навык, который у некоторых учеников редко бывает на практике [20].

Вероятно, образовательное использование будет наиболее быстро интегрировано в отоларингологию в будущем. Можно распечатать модели с определенными патологиями и аномалиями, чтобы лучше подготовиться к конкретной операции. Это может увеличить подверженность редким патологиям, с которыми ординаторы не могли бы иначе столкнуться во время обучения. Существуют обучающие модели (ElePhant), которые позволяют тренироваться с обратной связью в реальном времени. В них жизненно важные структуры (например, лицевой нерв) заменены либо проводящим сплавом, либо оптоволоконным материалом; непреднамеренная травма предупреждает пользователя, обеспечивая немедленную обратную связь.

Это позволяет ординаторам делать ошибки на моделях, а не на пациентах [21].

Трансплантация, протезирование и реконструкция. Еще одна область, в которой может оказаться полезной 3D-печать, – это синтез имплантируемых структурных тканей. Это особенно важно в отношении пластики и реконструкции лица, где функциональные и эстетические результаты имеют первостепенное значение. В исследовании модели на мышах искусственный носовой хрящ крыльев носа был изготовлен путем 3D-печати смолы жевательной резинки [22]. В будущем такие структуры могут быть использованы вместе с клетками человека для реконструкции носового хрящевого скелета. Аналогичная работа была проделана для реконструкции ушной раковины, чтобы определить возможность создания индивидуального ушного имплантата с помощью 3D-печати [23]. Одна группа напечатала на 3D-принтере трансплантаты барабанной перепонки, которые, как было обнаружено, лучше сопротивлялись деформации, чем височная фасция, и устраняли необходимость в дополнительных разрезах кожи и времени для сбора фасции [24].

Одна из самых интересных перспектив развития технологий 3D-печати – это проведение сложных реконструктивных операций на голове и шее. При таких сложных и длительных операциях создание моделей и протезов может сократить время операции, потенциально уменьшая кровопотерю, воздействие на рану и продолжительность анестезии. При планировании сложных реконструкций свободного лоскута можно использовать 3D-печать, чтобы обеспечить адекватное покрытие дефекта и разумную близость к сосудистому источнику.

Более сложное производство тканей и органов может быть полезно для коррекции врожденных аномалий, реконструкции раковых дефектов и восстановления травматических разрывных повреждений. В отоларингологии это могут быть косточки, улитковые и вестибулярные структуры, носовые раковины, гортанные субъединицы и др. Хотя проблемы с отторжением все еще могут возникать при 3D-печати, снизить вероятность осложнений может аутологичная ткань или источники стволовых клеток [25].

Выводы. В настоящее время многие отоларингологические приложения для 3D-печати находятся на предварительной стадии разработки. Дальнейшая интеграция технологий 3D-печати может привести к улучшению ухода за пациентами, хирургическим результатам и обучению врачей. Однако из-за высокой стоимости данная технология пока малодоступна. В перспективе 3D-печать может улучшить обучение врачей хирургическим доступам к переднему и боковому основаниям черепа, стентированию и реконструкции дыхательных путей, восстановлению дефектов костных и мягких тканей лица, головы и шеи.

Поступила: 09.03.22; рецензирована: 25.03.22;
принята: 31.03.22.

Литература

1. Терновой С.К. Томографические методы диагностики – лицо современной радиологии / С.К. Терновой, В.Е. Сеницын // Материалы Всероссийского конгресса лучевых диагностов. 2007. С. 3–7.
2. Терновой С.К. Развитие компьютерной томографии и прогресс лучевой диагностики / С.К. Терновой, В.Е. Сеницын // Радиология, практика. 2005. № 4. С. 23–29.
3. Календер В. Основы рентгеновской компьютерной и магнитно-резонансной томографии / В. Календер. М.: Техносфера, 2006.
4. Нигматуллина Г.П. Компьютерная томография как современный метод исследования / Г.П. Нигматуллина, М.А. Давлетшин, З.А. Ягафарова // Сб. материалов V Международной заочной научно-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов. Казань, 2019. С. 220–222.
5. Garvey C.J. Computed tomography in clinical practice / C.J. Garvey, R. Hanlon // BMJ (Clinical research ed.). 2002. № 324 (7345). P. 1077–1080.
6. Gourtsoyiannis N.C. Radiologic-Pathologic Correlations from Head to Toe. Understanding the Manifestations of Disease / N.C. Gourtsoyiannis, P.R. Rosn // Springer. 2005. 764 p.
7. Lewis M.A. Multislice C.T.: opportunities and challenges / M.A. Lewis // Br J Radiol. 2001. № 74. P. 779–781.
8. Ngoa T.D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges / T.D. Ngoa, A. Kashania, G. Imbalzano, K.T.Q. Nguyen, D. Huib // Compos B Eng. 2018. № 143. P. 172–196.
9. Squelch A. 3D printing and medical imaging / A. Squelch // J Med Radiat Sci. 2018. № 65 (3). P. 171–172.
10. Tack P., Victor J., Gemmel P., Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review // Biomed Eng Online. 2016. № 15 (1). P. 115.
11. Chae M.P. Emerging Applications of Bedside 3D Printing in Plastic Surgery / M.P. Chae, W.M. Rozen, P.G. McMenamin, M.W. Findlay, R.T. Spychal, D.J. Hunter-Smith // Front Surg. 2015. № 2. – P. 25.
12. Patel A. Digital technologies in mandibular pathology and reconstruction / A. Patel, J. Levine, L. Brecht, P. Saadeh, D.L. Hirsch // Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am. 2012. № 20 (1). P. 95–106.
13. Shan X.F. Surgical Reconstruction of Maxillary and Mandibular Defects Using a Printed Titanium Mesh / X.F. Shan, H.M. Chen, J. Liang, J.W. Huang, Z.G. Cai // J Oral Maxillofac Surg. 2015. № 73 (7). P. 1431–1439.
14. Paydarfar J.A. MRI- and CT-Compatible Polymer Laryngoscope: A Step toward Image-Guided Transoral Surgery / J.A. Paydarfar, X. Wu, R.J. Halter // Otolaryngol Head Neck Surg. 2016. № 155 (2). P. 364–366.
15. Muelleman T.J. Individualized Surgical Approach Planning for Petroclival Tumors Using a 3D Printer / T.J. Muelleman, J. Peterson, N.I. Chowdhury, J. Gorup, P. Camarata, J. Lin // J Neurol Surg B Skull Base. 2016. № 77 (3). P. 243–248.
16. Daniel M. Frontal sinus models and onlay templates in osteoplastic flap surgery / M. Daniel, J. Watson, E. Hoskison, A. Sama // J Laryngol Otol. 2011. № 125 (1). P. 82–85.
17. Rose A.S. Pre-operative simulation of pediatric mastoid surgery with 3D-printed temporal bone models / A.S. Rose, C.E. Webster, O.L. Harrysson, E.J. Formeister, R.B. Rawal, C.E. Iseli // Int J Pediatr Otorhinolaryngol. 2015. № 79 (5). P. 740–744.
18. Nishimoto S. Three-dimensional mock-up model for chondral framework in auricular reconstruction, built with a personal three-dimensional printer / S. Nishimoto, Y. Sotsuka, K. Kawai, K. Fujita, M. Kakibuchi // Plast Reconstr Surg. 2014. № 134 (1). P. 180–181.

19. *Cohen J.* Creation of a 3D printed temporal bone model from clinical CT data / J. Cohen, S.A. Reyes // *Am J Otolaryngol.* 2015. № 36 (5). P. 619–624.
20. *Narayanan V.* Endoscopic skull base training using 3D printed models with pre-existing pathology / V. Narayanan, P. Narayanan, R. Rajagopalan et al. // *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 2015. № 272 (3). P. 753–757.
21. *Grunert R.* ElePhant-an anatomical electronic phantom as simulation-system for otologic surgery / R. Grunert, G. Strauss, H. Moeckel et al. // *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2006. № 1. P. 4408–4411.
22. *Xu Y.* Tissue engineering of human nasal alar cartilage precisely by using three-dimensional printing / Y. Xu, F. Fan, N. Kang et al. // *Plast Reconstr Surg.* 2015. № 135 (2). P. 451–458.
23. *Bos E.J.* Developing a parametric ear model for auricular reconstruction: a new step towards patient-specific implants / E.J. Bos, T. Scholten, Y. Song et al. // *J Craniomaxillofac Surg.* 2015. № 43 (3). P. 390–395.
24. *Kozin E.D.* Design, fabrication, and in vitro testing of novel three-dimensionally printed tympanic membrane grafts / E.D. Kozin, N.L. Black, J.T. Cheng et al. // *Hear Res.* 2016. № 340. P. 191–203.
25. *Ozbolat I.T.* Bioprinting toward organ fabrication: challenges and future trends / I.T. Ozbolat, Y. Yu // *IEEE Trans Biomed Eng.* 2013. № 60 (3). P. 691–699.