

ОБЗОРЫ

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2018

Уханов М.М.¹, Иващенко А.В.², Федяев И.М.³, Яблоков А.Е.³, Колганов И.Н.³, Тлустенко В.П.³**ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТОВ В СТОМАТОЛОГИИ. ЧАСТЬ 1. РОБОТ-АССИСТИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ-СТОМАТОЛОГОВ И СПЕЦИАЛИСТОВ**¹Клиника «ДДЦ» (Москва), 107392, г. Москва;²ООО «Инновационный стоматологический центр», 443035, г. Самара;³ГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Минздрава России, 443079, г. Самара

Введение. Первое применение робота в хирургической операции произошло в 1985 г. Робот PUMA 560 использовался для позиционирования иглы для биопсии головного мозга, по данным компьютерной томограммы. В 1994 г. хирургическая роботическая система Automated Endoscopic System for Optimal Positioning (AESOP), разработанная компанией Computer Motion, первая получила в США разрешение на применение в хирургической практике от Food and Drug Administration (FDA).

Цель. Провести анализ литературных и патентных источников и предложить предварительную классификацию диапазона применения робот-ассистированных систем в медицине.

Материал и методы. Проанализированы и систематизированы области применения робот-ассистированных систем (РАС) в медицине, а также возможность использования применения РАС для обучения специалистов.

Выводы. По нашему мнению, развитие робот-ассистированных систем должно включать в себя усовершенствование методов интраоперационной визуализации, средств диагностики, совершенствование хирургического инструментария, а также появление новых робот-ассистированных разработок. Мы предполагаем, что будущее медицинских операционных технологий за мехатронными устройствами, однако применение данных систем требует рационального подхода. Применение этого оборудования оправдано только в том случае, когда невозможно или значительно затруднено проведение операции врачом.

Ключевые слова: роботизированная система Da Vinci; роботы-симуляторы.

Для цитирования: Уханов М.М., Иващенко А.В., Федяев И.М., Яблоков А.Е., Колганов И.Н., Тлустенко В.П. Применение роботов в стоматологии. Часть 1. Робот-ассистированные системы для обучения студентов-стоматологов и специалистов. Российский стоматологический журнал. 2018; 22 (6): 314-324. <http://dx.doi.org/10.18821/1728-2802-2018-22-6-314-324>

Ukhanov M.M.¹, Ivashchenko A.V.², Fedyaev I.M.³, Yablokov A.E.³, Kolganov I.N.³, Tlustenko V.P.³

USE OF ROBOTS IN DENTISTRY. PART 1. ROBOTIC SYSTEM FOR TRAINING DENTAL STUDENTS AND PROFESSIONALS

¹ Clinic "DDC" (Moscow), 107392, Moscow;

² "Innovative dental center", 443035, Samara;

³ "Samara state medical University" Ministry of health of Russia, 443079, Samara

Introduction. The first use of the robot in surgery occurred in 1985. The PUMA 560 robot was used to position a needle for a brain biopsy according to a CT scan [2,4,5]. In 1994, Computer Motion's surgical robotic system, Automated Endoscopic System for Optimal Positioning (AESOP), was the first in the United States to receive permission for use in surgical practice from the Food and Drug Administration (FDA).

Purpose. To analyze the literature and patent sources and propose a preliminary classification of the range of application of robot-assisted systems in medicine.

Material and methods. Analyzed and systematized the field of application of robot-assisted systems (RAS) in medicine, as well as the possibility of using the application of RAS for training specialists.

Findings. In our opinion, the development of robot-assisted systems should include the improvement of methods of intraoperative imaging, diagnostic tools, the improvement of surgical instruments, as well as the emergence of new robot-assisted developments. We assume that the future of medical operational technologies is beyond mechatronic devices, but the use of these systems requires a rational approach. The use of this equipment is justified only in the case when it is impossible or significantly difficult to carry out the operation by a doctor.

Key words: robotic system; Da Vinci; simulator robots.

For citation: Ukhanov M.M., Ivashchenko A.V., Fedyaev I.M., Yablokov A.E., Kolganov I.N., Tlustenko V.P. Use of robots in dentistry. Part 1. Robotic system for training dental students and professionals. Rossiyskii stomatologicheskii zhurnal. 2018; 22(6): 314-324. <http://dx.doi.org/10.18821/1728-2802-2018-22-6-314-324>

For correspondence: Ukhanov Mikhail Mikhailovich, doctor-dentist-orthopedist, E-mail: uhanov1@yandex.ru

Acknowledgments. The study had no sponsorship.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received 19.09.18

Accepted 16.11.18

Для корреспонденции: Уханов Михаил Михайлович, врач-стоматолог-ортопед, E-mail: uhanov1@yandex.ru

Введение

В 1921 г. чешский писатель Карел Чапек использовал слово «робот» в своей научно-популярной пьесе «R.U.R.» (Rossum's Universal Robots – первый показ на сцене в Праге 25 января 1921 г.). Этимологическое происхождение слова «робот» можно найти в чешском языке – слово «робота» означает «принудительный труд», из древнецерковнославянского «работа» или «рабство» [1–3].

Первое применение робота в хирургической операции произошло в 1985 г. Робот PUMA 560 использовался для позиционирования иглы для биопсии головного мозга, по данным компьютерной томограммы [2, 4, 5]. В 1988 г. тот же робот выполнил первую хирургическую операцию – трансуретральную резекцию. Одно из основных отличий хирургического робота от шарнирного штатива заключается в том, что плечо робота, фиксирующее рабочий инструмент, соединяется несколькими суставами, и движения в каждом суставе высчитываются и регулируются компьютером [5]. В настоящее время в нейрохирургии применяются около 17 различных роботов (PUMA 200, Da Vinci, SOCRATES, Steady-hand Surgery, Neurolocate, Neuro-mate, Pathfinder, Neuroarm, Spine Assist, Renaissance, iArmS, EXPERT system, iSYS1 Robot, Spinal Robotics, Augmented Reality System, Neurosurgical Laser, ROSA и др.) [6].

В 1994 г. хирургическая роботическая система Automated Endoscopic System for Optimal Positioning (AESOP), разработанная компанией Computer Motion, первой получила в США разрешение на применение в хирургической практике от Food and Drug Administration (FDA). В 2000 г. разрешение от FDA получил самый распространённый на сегодняшний день хирургический робот da Vinci от компании Intuitive Surgical Inc [2]. В 2012 г. в мире в различных клиниках работало около 2600 роботов da Vinci, только за 2012 г. ими выполнено 450 000 хирургических операций (из них 2 % – операции в области головы и шеи) [7]. Согласно отчету компании Intuitive Surgical Inc, в 2017 г. выполнено 875 000 операций с применением роботов da Vinci, 4666 операционных оснащены роботами da Vinci (из них 3010 расположены в США) [8].

Робот-ассистированные системы (robot-assisted systems – RAS) – комплекс автоматизированных, механотронных, электронно-вычислительных техник, связанных между собой в единую систему.

Проведённый анализ литературных и патентных источников позволил нам предложить предварительную классификацию диапазона применения робот-ассистированных систем в медицине.

Области применения робот-ассистированных систем (RAS) в медицине:

- **реабилитационные RAS** – механотронные протезы, возмещающие утраченные функции;
- **сервисные RAS** – системы, позволяющие производить контроль документооборота в медицинских учреждениях, осуществлять наблюдение и контроль за лежачими больными;
- **клинические RAS** – системы, осуществляющие оперативное вмешательство.

Все робот-ассистированные системы предназначены для предоперационной диагностики, а затем терапевтического или хирургического лечения.

При планировании оперативного вмешательства следует учитывать:

1. Совместимость биофизических параметров пациента и технических параметров робот-ассистированной системы;
2. Совместимость получаемой информации между оператором и робот-ассистированной системой;
3. Совместимость эргономики робот-ассистированной системы по отношению как к пациенту, так и врачу-оператору.

Современные робот-ассистированные системы оснащены механическими манипуляторами, помогающими снизить негативное влияние человеческого фактора во время лечения. Однако эти современные системы не способны проводить критический анализ сложившейся клинической ситуации. В будущем данные системы будут оснащены искусственным интеллектом. Искусственные нейронные сети способны обобщать клиническую информацию, проводить ее критический анализ. На основе полученного анализа в будущем робот-ассистированные системы будут принимать решения о правильности проведения хирургического вмешательства.

Проведённый анализ литературы позволяет сделать вывод, что современные робот-ассистированные системы не являются полноценными роботами, так как не обладают искусственным интеллектом.

За рубежом помимо публикаций научных статей о методиках применения роботов в профильных медицинских журналах издаются несколько журналов, посвящённых роботизированной медицине. Например, Journal of Robotic Surgery выпускается с 2007 г. по 4 выпуска в год (<https://link.springer.com/journal/11701>) и The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery выпускается с 2004 г. по 4 выпуска в год (<https://onlinelibrary.wiley.com/journal/1478596x>).

Первое клиническое применение робота в области челюстно-лицевой хирургии было выполнено Kavanagh K.T. в 1994 г. с применением системы Robodoc [9, 10].

Первый робот, специально разработанный для применения в челюстно-лицевой области, – это система «Otto», представленная в сентябре 1999 г. [9, 11].

Количество научных публикаций о применении роботов в операциях челюстно-лицевой области резко растёт, особенно с 2009 г. (рис. 1) [9].

Во-первых, такой резкий рост публикаций связан с тем, что в 2006 г. был разработан новый вид хирургической операции с применением робота в области головы и шеи, обладающий значимыми клиническими преимуществами по сравнению с традиционным подходом, – TORS (transoral robotic surgery), а в 2009 г. после ряда публикаций об успешном лечении онкологических заболеваний по методу TORS FDA выдало разрешение на применение TORS при ранних стадиях заболевания (T1-T2) [12, 13]. Во-вторых, это связано с ростом количества роботов в операционных, и третьей причина – рост числа онкологических заболеваний в

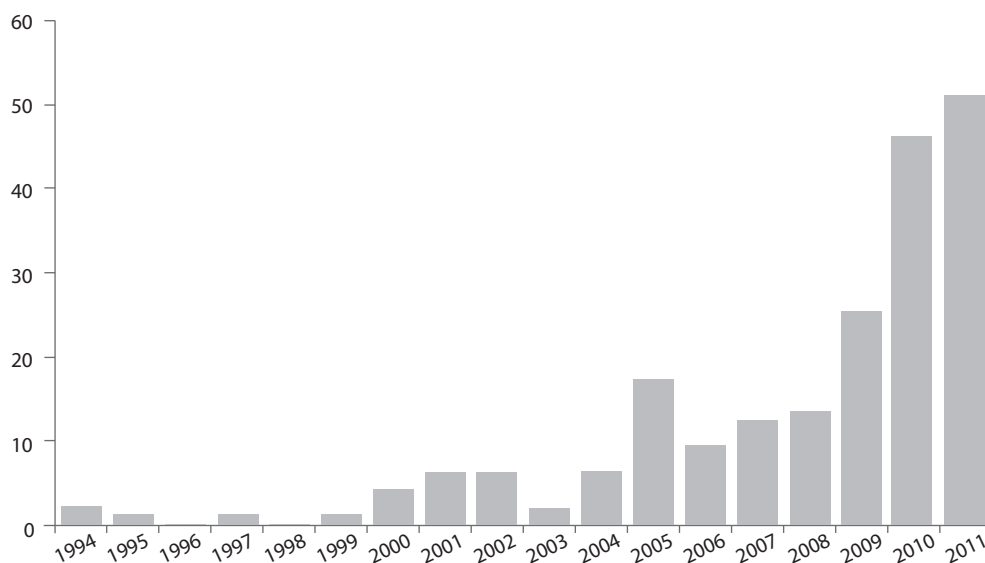


Рис. 1. Число научных публикаций о применении роботов при операциях челюстно-лицевой области, по данным De Ceulaer и др. [9].

области головы и шеи из-за эпидемии папилломовируса, а роботы в основном применяются для иссечения опухолей [14].

На начало июля 2018 г. в России функционирует 25 роботов da Vinci. Планируется создать учебный центр по роботической хирургии на базе РАН, ведётся разработка российского хирургического робота [15].

В 2016 г. робот Yomi компании Neocis (США) получил разрешение от FDA на применение в клинической практике при установке дентальных имплантатов [16].

Цель статьи – представить информацию о возможностях применения роботов в стоматологии на сегодняшний день и перспективах их использования в будущем.

При анализе научных статей, патентов, информации от фирм-производителей нами установлено, что на данный момент область применения роботов в стоматологии не ограничивается только хирургией, хотя именно в этой области произошло наиболее значимое внедрение роботов в клиническую практику, и подразделяется на четыре раздела:

- использование роботов при обучении студентов и врачей-стоматологов,
- в хирургической стоматологии и имплантологии,
- для препарирования зубов в ортопедической стоматологии,
- применение роботов в качестве функциональных тренажеров.

Применение роботов для обучения врачей-стоматологов

На сегодняшний день внедрение роботов как симуляторов дополненной и виртуальной реальности, так и физически имитирующих пациента, в процесс обучения врачей-стоматологов является желательным

и даже необходимым в ответ на изменившиеся этические и социальные запросы общества:

- пациентов больше заботит их безопасность во время стоматологического приема и они менее настроены быть «подопытными свинками» на первом клиническом приеме у студента;
- также студенты-стоматологи испытывают значительный стресс, если первое лечение они выполняют друг на друге;
- меньше пациентов с простыми клиническими случаями, подходящими для обучения;
- меньше высококвалифицированных преподавателей, доступных для обучения студентов мануальным навыкам;
- студенты ожидают внедрение новых технологий в процесс обучения.

Первичное обучение на роботах делает более плавным и менее сложным переход студентов-стоматологов к клинической практике. Позволит им отработать и закрепить навыки эргономики и инфекционной защиты в безопасных условиях, что, в свою очередь, снизит риски неудачи для их первого реального пациента [17–19].

В то же время было установлено, что виртуальный симулятор не может заменить традиционное обучение с инструктором и должен использоваться только в качестве дополнения [20].

1. Роботы-симуляторы, использующие дополненную реальность и виртуальную реальность для препарирования зубов

Дополненная реальность (AR) – когда 3D-виртуальные объекты интегрируются в реальную 3D-окружающую среду в реальном времени. Виртуальная реальность (VR) предлагает пользователям реальность внутри виртуальной 3D-модели. Современные стоматологические тренажеры используют и допол-



Рис. 2. Виртуальный симулятор DentSim.

А – голова фантома; В – верхняя инфракрасная камера; С – источник света; D – инфракрасный датчик [25].

ненную, и виртуальную реальность, с их помощью можно улучшить мануальные навыки, эргономику, координацию глаза – руки; недостатки таких тренажеров – высокая стоимость и наличие уроков, связанных только с препарированием зубов [21, 22].

Примеры роботов-симуляторов

DentSim (США) – виртуальный симулятор DentSim появился одним из первых на рынке в 1997 г. Он был разработан компанией DenX Ltd из Израиля, в настоящее время Image Navigation располагается в США (<https://image-navigation.com/home-page/dentsim/>). На сегодняшний день в различных университетах мира установлено 400 симуляторов DentSim. Система состоит из головы фантома, набора стоматологических инструментов (наконечник), инфракрасных датчиков, верхней инфракрасной камеры, монитора и двух компьютеров (рис. 2). Инфракрасные датчики сканируют фантом и пластмассовые зубы, передавая информацию на один из компьютеров. Второй компьютер используется для демонстрации обучающей программы. Симулятор позволяет демонстрировать препарирование зубов студентом на мониторе в реальном режиме времени, что дает возможность тренироваться и улучшать свои мануальные навыки [23–25].

В исследовании Jasinevicius T.R. и др. доказано, что применение виртуального симулятора DentSim значительно (в пять раз) снижает время на обучение препарированию зубов при таком же качестве знаний [26].

VirTeaSy Dental (Франция) – виртуальный симулятор для обучения студентов-стоматологов, разработанный компанией HRV (рис. 3). Содержит программы в области имплантологии, кариесологии, протезирования и эндодонтии, включены реальные клинические случаи (<http://www.hrv-simulation.com/en/virteasy-dental/virteasy-dental-savoir-plus.html>).

SIMODONT – виртуальный симулятор, выпускаемый компанией Moog (Голландия) (рис. 4). Програм-



Рис. 3. Виртуальный симулятор VirTeaSy Dental.

ма создана при участии ACTA (Academic Centre for Dentistry in Amsterdam). Для воссоздания реалистичной обстановки обучающийся держит в руках стоматологическое зеркало и наконечник, воспроизводится звук работающего наконечника, изменяется скорость вращения боров и сверел при помощи педали. Программа содержит множество различных уроков и реальных клинических случаев. Кроме того, возможно отсканировать свои инструменты, клиническую ситуацию и создать собственный учебный курс.

Mirghani I. и др. исследовали качество выполнения учебных задач на виртуальном симуляторе SIMODONT у 289 врачей с опытом работы от 1 до 5 лет [27]. Выявлено значительное различие между опытными врачами и теми, кто имел опыт не более 1 года. Однако каких-либо различий между врачами с опытом 3–5 лет не было обнаружено.

В исследовании Bakr M.M. и др. не обнаружили существенной разницы в психомоторных навыках двух групп студентов второго года обучения (по 20 человек в каждой), при том, что одна из групп прошла вначале обучение по препарированию кариозных полостей на виртуальном симуляторе, а потом на традиционном фантоме, а вторая группа – наоборот [28]. Нужно отметить, что занятие на виртуальном симуляторе длилось всего 30 мин, и большинство (62,5 %) студентов считали, что тренировка на симуляторе улучшила их мануальные навыки (<http://www.moogdentaltrainer.com/>).

Kobra – виртуальный симулятор, разработанный компанией Forsslund Systems (Швеция) (рис. 5). Составляет из тактильного устройства, имитирующего наконечник, большого монитора, 3D-стереочков и ножной педали. Симулятор Kobra предназначен для обучения хирургической стоматологии: удаления зубов, в том числе ретенированных и третьих моляров,

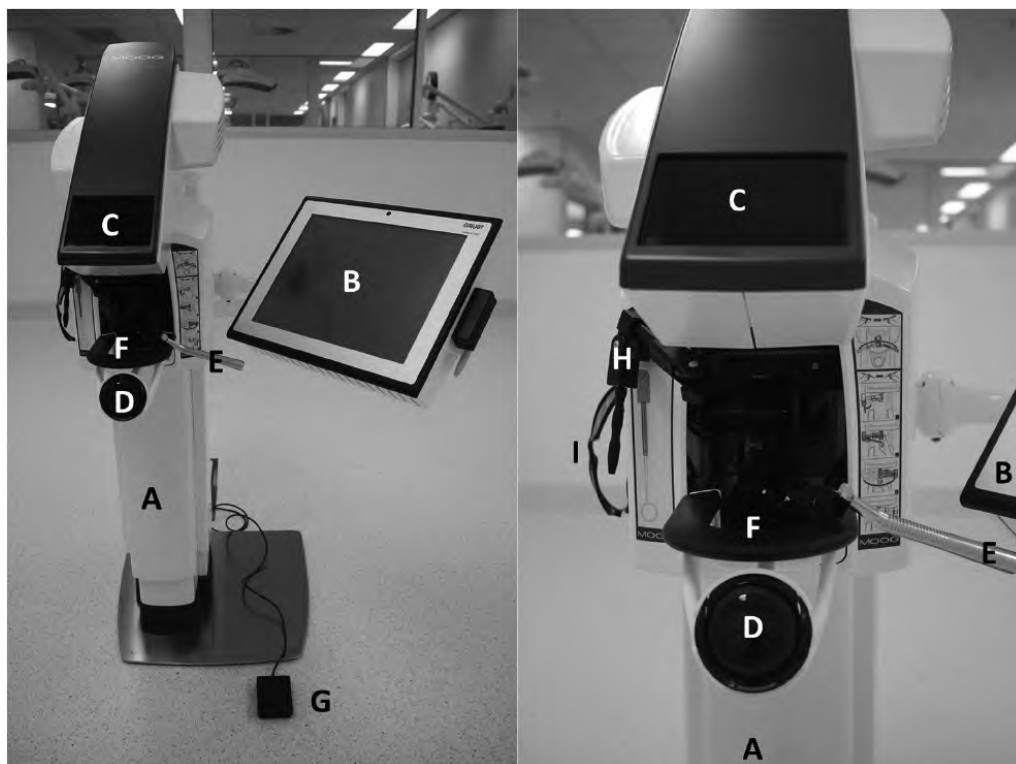


Рис. 4. Виртуальный симулятор SIMODONT.

А – симулятор; В – монитор компьютера; С – стереопроектор; D – джойстик; Е – наконечник; F – подставка для рук; G – ножная педаль; H – держатель стоматологического зеркала; I – виртуальные очки [24].



Рис. 5. Виртуальный симулятор Kobra (Швеция).

операции резекции верхушки корня и т. д. Разработан при участии двух университетов Швеции: Каролинского института и Королевского института технологий (<http://www.kobrasimulator.com/>).

Voxel-Man Dental – виртуальный симулятор, разработанный компанией Voxel-Man (Германия). Компания Voxel-Man создана в 1984 г. исследовательской группой под руководством профессора Karl Heinz Nöhne из медицинского центра университета Hamburg-Eppendorf для решения проблем 3D-визуализации человеческого тела. Стоматологический симулятор позволяет пользователю применять анимированные боры различной формы на низкой и высокой скоростях, которые регулируются ножной педалью. Программа дает возможность рассматривать зубы со всех сторон, используя виртуально стоматологическое зеркало. Изображения зубов, в том числе поперечные срезы, были получены с микротомографий реальных зубов (<https://www.voxel-man.com/simulators/dental/>).

Леонардо – гибридный симулятор, разработанный российской компанией «ГЭОТАР» в 2017 г., апробирован на кафедре пропедевтики стоматологических заболеваний РУДН и презентован на стоматологической выставке в Кёльне (Германия) IDS2017, одобрен стоматологической ассоциацией России (СтАР). В комплект симулятора входит стоматологическая турбинная установка, турбинный наконечник, микро мотор, рабочее место ассистента-стоматолога, самодренируемый манекен торса и головы стоматологическо-

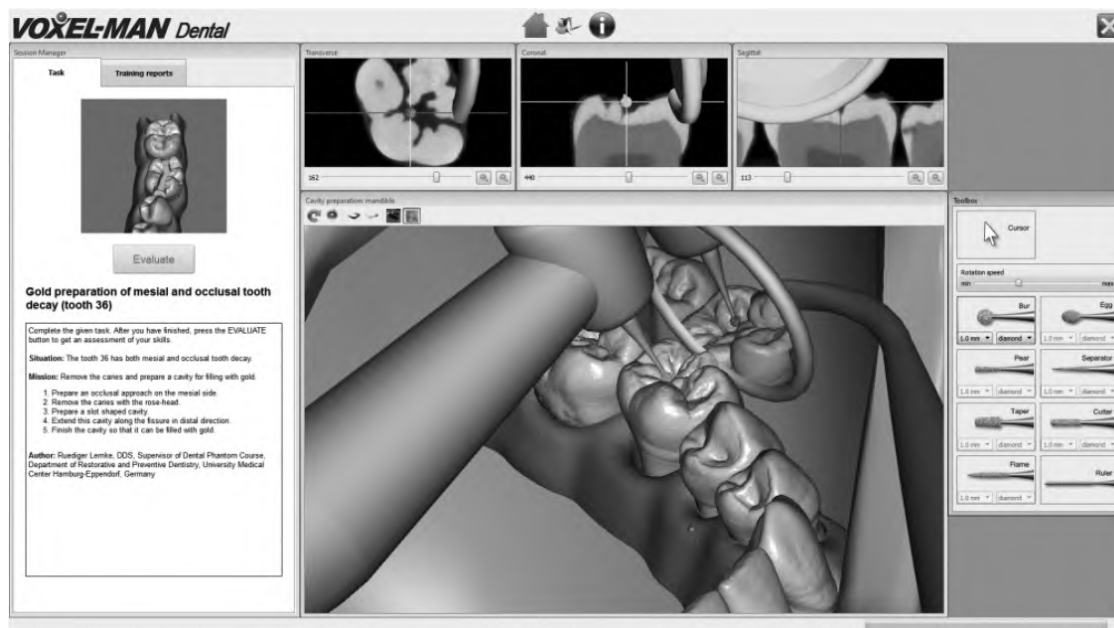


Рис. 6. Программа виртуального симулятора Voxel-Man Dental.



Рис. 7. Гибридный симулятор Леонардо (Россия).

го пациента со встроенными моделями зубных рядов на металлическом артикуляторе (рис. 7). Датчиками отслеживается расположение в пространстве турбинного наконечника, микромотора, боров, стоматологического зеркала, карпульного шприца. Доступны клинические задачи в области терапевтической стома-

тологии, ортопедической стоматологии, выполнения местной анестезии. (<http://www.leonardo-dental.ru/>).

ASCLEPIA – виртуальный симулятор, разработанный компанией Лаборатория виртуальных систем (Россия). Содержит два гаптик-устройства, создающие тактильные ощущения (рис. 8). Программным обеспечением симулируется работа всеми типами боров по ISO и ГОСТ, а также основными типами бормашин и их наконечников. Число оборотов регулируется ножной педалью. Включено 10 задач из раздела терапевтической стоматологии. Есть возможность создания собственных заданий. (<http://lab-vs.ru>).

2. Роботы, физически имитирующие пациента

Фантом человеческой головы со встроенными пластиковыми челюстями и виртуальная модель челюстей слишком сильно отличаются от реального пациента. В Японии для обучения студентов-стоматологов разработаны роботы, полностью имитирующие тело человека [29, 30].

Dentaroid – робот, имитирующий пациента стоматолога, создан японской компанией tmsuk при участии университетов Showa, Waseda и Kogakuin (рис. 9). Первые варианты этого робота назывались Showa Hanako 1 и Showa Hanako 2. Рост Dentaroid – 157 см, кожу имитирует мягкая пластмасса, мягкие ткани в полости рта и язык сделаны из силикона. Робот может выполнять 12 различных движений: мигание, движение глаз, движения языка (физиологические), неожиданное покачивание головы при ощущении боли, чихание, кашель (удушьё), движения рук, изменение пульса и формы дыхания и др. Встроена функция распознавания голоса. (<http://www.tmsuk.co.jp/en/products/>).

Simroid – робот, имитирующий пациента врача-стоматолога, разработан компаниями Kokoro и Morita



Рис. 8. Виртуальный симулятор ASCLEPIA (Россия).

(Япония). Сенсорные датчики расположены в полости рта и на теле робота. Он отвечает на действия стоматолога движениями глаз, головы, губ, рук, может открывать и закрывать рот, имитируя естественную реакцию пациента. Робот распознает японский и английский языки, может отвечать на простые вопросы. Две видеокamеры записывают процесс лечения. Разработано несколько сценариев тренировочного урока для стоматолога.

Доказано, что применение роботов Simroid улучшает не только мануальные навыки, но и навыки общения с пациентом как у студентов-стоматологов, так и у врачей, недавно получивших диплом [31].

Кроме того, в исследовании Abe S. и др. установлено, что после обучения на роботе Simroid студенты получают больше навыков в области эргономики, безопасности и инфекционного контроля по сравнению с применением стандартного фантома головы, и, согласно опросу, робот очень похож на реального пациента [32]. Однако мануальные навыки по препарированию зуба под коронку были одинаковы у всех студентов, независимо от вида фантома (<https://www.morita.com/group/en/products/educational-and-training-systems/training-simulation-system/simroid/>).

3. Хирургические роботы-симуляторы

Виртуальные симуляторы применяются в различных областях медицины, но особенно важно их использование в хирургии, так как во время операции мануальные навыки имеют решающее значение [33, 34].



Рис. 9. Робот-пациент стоматолога – Dentaroid от фирмы tsmuk (Япония).



Рис. 10. Робот-пациент стоматолога Simroid от фирмы Morita (Япония).

Использовать самого робота для обучения робот-ассистированной хирургии экономически неэффективно из-за высокой стоимости робота, поэтому были разработаны специальные виртуальные симуляторы. В 2015 г. на рынке представлено 5 систем для обучения RAS: Surgical Education Platform (SEP; SimSurgery, Oslo, Норвегия), Robotic Surgical Simulator (RoSS; Simulated Surgical Systems, США), dV-Trainer (Mimic, США), da Vinci Skills Simulator (dVS; Intuitive Surgical, США) и RobotiX Mentor (3D Systems, Symbionix Products, США) [35, 36].

Примеры виртуальных симуляторов RAS

Surgical Education Platform – разработана в компании SimSurgery (1999 г.) (Норвегия).

Robotic Surgical Simulator (RoSS) – это симулятор для обучения использованию робота da Vinci, разработан компанией Simulated Surgical Systems (США). Программа обучения включает, в том числе реальные



Рис. 11. Виртуальный симулятор от компании SimSurgery.



Рис. 13. Виртуальный симулятор RAS dV-Trainer от компании Mimic (США).



Рис. 12. Виртуальный симулятор Robotic Surgery Simulator от компании Simulated Surgical Systems (США).



Рис. 14. Виртуальный симулятор RAS Da Vinci от компании Intuitive Surgical (США).



Рис. 15. Виртуальный симулятор RAS RobotiX Mentor от компании 3D Systems (США).

клинические случаи (<http://www.simulatedurgicals.com/ross.html>).

dV-Trainer – разработан компанией Mimic (США) в 2007 г. Обучает применению хирургического робота da Vinci (<http://mimicsimulation.com/dv-trainer/>).

Компания Intuitive Surgical (США), производитель робота da Vinci, предлагает два варианта обучения: Da Vinci Simulator Box – освоение базовых навыков RAS, и Da Vinci Sim Now – развернутая программа обучения (<https://www.intuitive.com/en/products-and-services/da-vinci/education>).

RobotiX Mentor – симулятор RAS от компании 3D Systems (США)

(<https://www.3dsystems.com/medical-simulators/symbionix-robotix-mentor>).

В 2012 г. Goh A.C. и др. разработали Global Evaluative Assessment of Robotic Skills (GEARS) – общую оценочную экспертизу роботизированных навыков [37]. Она включает в себя 6 сфер деятельности: восприятие глубины, бимануальная ловкость, эффективность, чувствительность к силе, автономность и роботизированный контроль. Каждая сфера оценивается по 5-бальной шкале, в которой есть 3 оценочные характеристики. В исследовании установлено, что такая экспертиза просто и эффективно определяет уровень владения RAS у хирургов с различным опытом работы.

Dubin AK и др. сравнили экспертизу GEARS и оценку виртуальных симуляторов Mimic dV-Trainer (MdVT) и da Vinci [38]. Некоторые оценки совпадали, а некоторые – нет. Анализ этих данных поможет улучшить обучение RAS.

По мнению Колонтарева К.Б. и др., без использования виртуальных симуляторов обучение врачей-

хирургов на первоначальном этапе применению RAS малоэффективно и занимает более длительный период времени [39]. В обзорной статье описаны четыре виртуальных симулятора для хирургов – роботический хирургический симулятор (Robotic Surgical Simulator – RoSS), симулятор ProMIS (Haptica, Ирландия), симулятор Mimic dV-Trainer (MdVT) и симулятор da Vinci. Отмечено, что в большинстве центров обучения роботической хирургии в Европе и США предпочтение отдается симулятору da Vinci. Симулятор da Vinci отличается высокой эргономичностью – отсутствием дополнительных устройств. Выполнение симуляционного обучения происходит непосредственно за консолью реальной хирургической системы при помощи присоединения тренировочного оборудования к тыловой части консоли.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Capek K. Rossum's Universal Robots. trans. Playfair N., Selver P.; ed. W.A. Landes. New York: Doubleday; 1923.
2. Колонтарев К.Б., Пушкарь Д.Ю., Говоров А.В., Шептунов С.А. История развития роботических технологий в медицине». *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки*. 2014; 4 (32): 125–40.
3. De Ceulaer J., De Clercq C., Swennen G.R. Robotic surgery in oral and maxillofacial, craniofacial and head and neck surgery: a systematic review of the literature. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.* 2012; 41(11): 1311–24. doi: 10.1016/j.ijom.2012.05.035.
4. Kwok Y.S., Hou J., Jonckheere E.A., Hayati S. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1988; 35: 153–60. doi:10.1109/10.1354
5. Zamorano L., Li Q., Jain S., Kaur G. «Robotics in neurosurgery: state of the art and future technological challenges. *Int. J. Med. Robot.* 2004; 1(1): 7–22.
6. Ahmed S.I., Javed G., Mubeen B., Bareeqa S.B., Rasheed H., Rehman A., et al. Robotics in neurosurgery: A literature review. *J. Pak Med. Assoc.* 2018; 68(2): 258–63.
7. *Robotic surgery 'here to stay' despite concerns about cost, lack of data.* Hem.Onc. Today, December 25, 2013.
8. *Investor Presentation* <http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=122359&p=irol-IRHome>
9. De Ceulaer J., De Clercq C., Swennen G.R. «Robotic surgery in oral and maxillofacial, craniofacial and head and neck surgery: a systematic review of the literature. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.* 2012; 41(11): 1311–24. doi: 10.1016/j.ijom.2012.05.035.
10. Kavanagh K.T. «Applications of image-directed robotics in otolaryngologic surgery. *Laryngoscope.* 1994; 104(3 Pt 1): 283–93.
11. Lueth T.C., Hein A., Albrecht J., Dimitras M., Zachow S., Heissler E., et al. *A surgical robot system for maxillofacial surgery. IEEE international conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON).* 1998; 2470–5.
12. O'Malley B.W. Jr., Weinstein G.S., Snyder W., Hockstein N.G. «Transoral robotic surgery (TORS) for base of tongue neoplasms. *Laryngoscope.* 2006; 116(8): 1465–72.
13. Cracchiolo J.R., Roman B.R., Kutler D.I., Kuhel W.I., Cohen M.A. Adoption of transoral robotic surgery compared with other surgical modalities for treatment of oropharyngeal squamous cell carcinoma. *J. Surg. Oncol.* 2016; 114(4): 405–11. doi: 10.1002/jso.24353.
14. Borumandi F., Cascarini L. *Robotics in oral and maxillofacial surgery: How trans-oral robotic surgery can treat cancer in the oropharyngeal space.* May 2018 *Annals of The Royal College of Surgeons of England* 100(6_sup):16-18. DOI: · 0.1308/rcsann.supp1.16
15. РАН планирует создать тренировочный центр роботической хирургии. *Материалы портала «Научная Россия».* 2018; 15: 50.

- <https://scientificrussia.ru/articles/ran-planiruet-sozdat-trenirovochnyj-tsentr-robotizirovannoj-meditsiny>
16. Robotic Implant System Gets FDA Clearance. *Dentistry Today*. 06 Mar 2017. <http://dentistrytoday.com/news/industrynews/item/1749-robotic-implant-system-gets-fda-clearance>
 17. Ziv A., Wolpe P.R., Small S.D., Glick S. Simulation-based medical education: an ethical imperative. *Acad. Med.* 2003; 78: 783–8.
 18. Buchanan J.A. Use of simulation technology in dental education. *J. Dent. Educ.* 2001; 65(11): 1225–31.
 19. Suganuma T., Kaizawa N., Ono Y., et al. «Development of virtual patient system to improve a fundamental clinical skill». *J. Japan Assoc Simul-Based Edu Healthcare Profess.* 2013; 1: 1-5.
 20. Bakr M.M., Massey W.L., Alexander H. Can virtual simulators replace traditional preclinical teaching methods: a students' perspective? *Int. J. Dent. Oral Health.* 2015; 2 (1). <http://dx.doi.org/10.16966/2378-7090.149>.
 21. Huang T.K., Yang C.H., Hsieh Y.H., Wang J.C., Hung C.C. Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) applied in dentistry. *Kaohsiung J. Med. Sci.* 2018; 34(4): 243–8. doi: 10.1016/j.kjms.2018.01.009.
 22. Wang D., Li T., Zhang Y., Hou J. Survey on multisensory feedback virtual reality dental training systems. *Eur. J. Dent. Educ.* 2016; 20(4): 248–60. doi: 10.1111/eje.12173.
 23. Rose J.T., Buchanan J.A., Sarrett D.C. The Dent Sim system. *J. Dent. Educ.* 1999; 63(5): 421–3.
 24. Welk A., Splieth C., Rosin M., Kordass B., Meyer G. DentSim - a future teaching option for dentists. *Int. J. Comput. Dent.* 2004; 7(2): 123–30.
 25. Roy E., Bakr M.M., George R. The need for virtual reality simulators in dental education: A review. *Saudi Dent J.* 2017; 29(2): 41–7. doi: 10.1016/j.sdentj.2017.02.001.
 26. Jasinevicius T.R., Landers M., Nelson S., Urbankova A. An evaluation of two dental simulation systems: virtual reality versus contemporary non-computer-assisted. *J. Dent. Educ.* 2004; 68(11): 1151–62.
 27. Mirghani I., Mushtaq F., Allsop M.J., Al-Saud L.M., Tickhill N., Potter C., et al. Capturing differences in dental training using a virtual reality simulator. *Eur. J. Dent. Educ.* 2018; 22(1): 67–71. doi: 10.1111/eje.12245.
 28. Bakr M.M., Massey W., Alexander H. Students' evaluation of a 3DVR haptic device (Simodont®). Does early exposure to haptic feedback during preclinical dental education enhance the development of psychomotor skills? *Int. J. Dent. Clin.* 2014; 6: 1–7.
 29. Kumar P.Y., Dixit P., Kalaivani V., Rajapandian K. Future Advances in Robotic Dentistry. *J. Dent. Health Oral Disord. Ther.* 2017; 7(3): 00241. DOI: 10.15406/jdhodt.2017.07.00241
 30. Hamura A., Uzuka S., Miyashita W., Akiyama H., Hara S. «Development of patient simulation systems for dental education, SIMROID. *J. Dent. Res.* 2011; 87 Special Issue #617.
 31. Akiyama H., Uzuka S., Miyashita W., Hara S., Hamura A. Development of New patient simulation systems (SIMROID) for prosthodontic clinical training. *JJDEA.* 2013; 29: 11-20.
 32. Abe S., Noguchi N., Matsuka Y., Shinohara C., Kimura T., Oka K., et al. Educational effects using a robot patient simulation system for development of clinical attitude. *Eur. J. Dent. Educ.* 2018; 22(3): e327-e336. doi: 10.1111/eje.12298.
 33. Syed H., Shankar S. A meta-analysis of the training effectiveness of virtual reality surgical simulators. *IEEE Trans Inf Technol Biomed.* 2006; 10(1): 51–8.
 34. Kneebone R. Simulation in surgical training: educational issues and practical implications. *Med. Educ.* 2003; 37: 267–77.
 35. Moglia A., Ferrari V., Morelli L., Ferrari M., Mosca F., Cuschieri A. A Systematic Review of Virtual Reality Simulators for Robot-assisted Surgery. *Eur. Urol.* 2016; 69(6): 1065-80. doi: 10.1016/j.eururo.2015.09.021.
 36. Bric J.D., Lombard D.C., Frelich M.J., Gould J.C. Current state of virtual reality simulation in robotic surgery training: a review. *Surg. Endosc.* 2016; 30(6): 2169–78. doi: 10.1007/s00464-015-4517-y.
 37. Goh A.C., Goldfarb D.W., Sander J.C., Miles B.J., Dunkin B.J. Global evaluative assessment of robotic skills: validation of a clinical assessment tool to measure robotic surgical skills. *J. Urol.* 2012; 187(1): 247–52. doi: 10.1016/j.juro.2011.09.032.
 38. Dubin A.K., Smith R., Julian D., Tanaka A., Mattingly P. A Comparison of Robotic Simulation Performance on Basic Virtual Reality Skills: Simulator Subjective Versus Objective Assessment Tools. *J. Minim Invasive Gynecol.* 2017; 24(7): 1184–9. doi: 10.1016/j.jmig.2017.07.019.
 39. Колонтарев К.Б., Шептунов С.А., Прилепская Е.А., Мальцев Е.Г., Пушкарь Д.Ю. Симуляторы в обучении робот-ассистированной хирургии (обзор литературы). *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки.* 2016; 2(38): 116–31, DOI: 10.21685/2072-3032-2016-2-12.

REFERENCES

1. Capek K. Rossum's Universal Robots. trans. Playfair N., Selver P.; ed. W.A. Landes. New York: Doubleday; 1923.
2. Kolontarev K.B., Pushkar D.Yu., Govorov A.V., Sheptunov S.A. History of robotic technology in medicine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Privolzhskiy region. Meditsinskie nauki.* 2014; 4 (32): 125–40. (in Russian)
3. De Ceulaer J., De Clercq C., Swennen G.R. Robotic surgery in oral and maxillofacial, craniofacial and head and neck surgery: a systematic review of the literature. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.* 2012; 41(11): 1311–24. doi: 10.1016/j.ijom.2012.05.035.
4. Kwok Y.S., Hou J., Jonckheere E.A., Hayati S. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1988; 35: 153–60. doi:10.1109/10.1354
5. Zamorano L., Li Q., Jain S., Kaur G. «Robotics in neurosurgery: state of the art and future technological challenges. *Int. J. Med. Robot.* 2004; 1(1): 7–22.
6. Ahmed S.I., Javed G., Mubeen B., Bareeqa S.B., Rasheed H., Rehman A., et al. Robotics in neurosurgery: A literature review. *J. Pak Med. Assoc.* 2018; 68(2): 258–63.
7. *Robotic surgery 'here to stay' despite concerns about cost, lack of data.* Hem.Onc. Today, December 25, 2013.
8. *Investor Presentation* <http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=122359&p=irol-IRHome>
9. De Ceulaer J., De Clercq C., Swennen G.R. «Robotic surgery in oral and maxillofacial, craniofacial and head and neck surgery: a systematic review of the literature. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.* 2012; 41(11): 1311–24. doi: 10.1016/j.ijom.2012.05.035.
10. Kavanagh K.T. «Applications of image-directed robotics in otolaryngologic surgery. *Laryngoscope.* 1994; 104(3 Pt 1): 283–93.
11. Lueth T.C., Hein A., Albrecht J., Dimitras M., Zachow S., Heissler E., et al. *A surgical robot system for maxillofacial surgery. IEEE international conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON).* 1998; 2470–5.
12. O'Malley B.W. Jr., Weinstein G.S., Snyder W., Hockstein N.G. «Transoral robotic surgery (TORS) for base of tongue neoplasms. *Laryngoscope.* 2006; 116(8): 1465–72.
13. Cracchiolo J.R., Roman B.R., Kutler D.I., Kuhel W.I., Cohen M.A. Adoption of transoral robotic surgery compared with other surgical modalities for treatment of oropharyngeal squamous cell carcinoma. *J. Surg. Oncol.* 2016; 114(4): 405–11. doi: 10.1002/jso.24353.
14. Borumandi F., Cascarini L. *Robotics in oral and maxillofacial surgery: How trans-oral robotic surgery can treat cancer in the oropharyngeal space.* May 2018 *Annals of The Royal College of Surgeons of England* 100(6_sup):16-18. DOI: · 0.1308/rcsann.suppl.16
15. RAS plans to create a training center for robotic surgery. *Materialy portala "Nauchnaya Rossiya".* 2018; 15: 50. (in Russian) <https://scientificrussia.ru/articles/ran-planiruet-sozdat-trenirovochnyj-tsentr-robotizirovannoj-meditsiny>
16. Robotic Implant System Gets FDA Clearance. *Dentistry Today*. 06 Mar 2017. <http://dentistrytoday.com/news/industrynews/item/1749-robotic-implant-system-gets-fda-clearance>
17. Ziv A., Wolpe P.R., Small S.D., Glick S. Simulation-based medical education: an ethical imperative. *Acad. Med.* 2003; 78: 783–8.
18. Buchanan J.A. Use of simulation technology in dental education. *J. Dent. Educ.* 2001; 65(11): 1225–31.
19. Suganuma T., Kaizawa N., Ono Y., et al. «Development of virtual patient system to improve a fundamental clinical skill». *J. Japan Assoc Simul-Based Edu Healthcare Profess.* 2013; 1: 1-5.
20. Bakr M.M., Massey W.L., Alexander H. Can virtual simulators replace traditional preclinical teaching methods: a students' perspective? *Int. J. Dent. Oral Health.* 2015; 2 (1). <http://dx.doi.org/10.16966/2378-7090.149>.
21. Huang T.K., Yang C.H., Hsieh Y.H., Wang J.C., Hung C.C. Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) applied in dentistry. *Kaohsiung J. Med. Sci.* 2018; 34(4): 243–8. doi: 10.1016/j.kjms.2018.01.009.
22. Wang D., Li T., Zhang Y., Hou J. Survey on multisensory feedback virtual reality dental training systems. *Eur. J. Dent. Educ.* 2016; 20(4): 248–60. doi: 10.1111/eje.12173.

23. Rose J.T., Buchanan J.A., Sarrett D.C. The Dent Sim system. *J. Dent. Educ.* 1999; 63(5): 421–3.
24. Welk A., Splieth C., Rosin M., Kordass B., Meyer G. DentSim - a future teaching option for dentists. *Int. J. Comput. Dent.* 2004; 7(2): 123–30.
25. Roy E., Bakr M.M., George R. The need for virtual reality simulators in dental education: A review. *Saudi Dent J.* 2017; 29(2): 41–7. doi: 10.1016/j.sdentj.2017.02.001.
26. Jasinevicius T.R., Landers M., Nelson S., Urbankova A. An evaluation of two dental simulation systems: virtual reality versus contemporary non-computer-assisted. *J. Dent Educ.* 2004; 68(11): 1151–62.
27. Mirghani I., Mushtaq F., Allsop M.J., Al-Saud L.M., Tickhill N., Potter C., et al. Capturing differences in dental training using a virtual reality simulator. *Eur. J. Dent Educ.* 2018; 22(1): 67–71. doi: 10.1111/eje.12245.
28. Bakr M.M., Massey W., Alexander H. Students' evaluation of a 3DVR haptic device (Simodont®). Does early exposure to haptic feedback during preclinical dental education enhance the development of psychomotor skills? *Int. J. Dent. Clin.* 2014; 6: 1–7.
29. Kumar P.Y., Dixit P., Kalaivani V., Rajapandian K. Future Advances in Robotic Dentistry. *J. Dent. Health Oral Disord. Ther.* 2017; 7(3): 00241. DOI: 10.15406/jdhodt.2017.07.00241
30. Hamura A., Uzuka S., Miyashita W., Akiyama H., Hara S. «Development of patient simulation systems for dental education, SIMROID. *J. Dent. Res.* 2011; 87 Special Issue #617.
31. Akiyama H., Uzuka S., Miyashita W., Hara S., Hamura A. Development of New patient simulation systems (SIMROID) for prosthodontic clinical training. *JJDEA.* 2013; 29: 11–20.
32. Abe S., Noguchi N., Matsuka Y., Shinohara C., Kimura T., Oka K., et al. Educational effects using a robot patient simulation system for development of clinical attitude. *Eur. J. Dent. Educ.* 2018; 22(3): e327–e336. doi: 10.1111/eje.12298.
33. Syed H., Shankar S. A meta-analysis of the training effectiveness of virtual reality surgical simulators. *IEEE Trans Inf Technol Biomed.* 2006; 10(1): 51–8.
34. Kneebone R. Simulation in surgical training: educational issues and practical implications. *Med. Educ.* 2003; 37: 267–77.
35. Moglia A., Ferrari V., Morelli L., Ferrari M., Mosca F., Cuschieri A. A Systematic Review of Virtual Reality Simulators for Robot-assisted Surgery. *Eur. Urol.* 2016; 69(6): 1065–80. doi: 10.1016/j.eururo.2015.09.021.
36. Bric J.D., Lombard D.C., Frelich M.J., Gould J.C. Current state of virtual reality simulation in robotic surgery training: a review. *Surg. Endosc.* 2016; 30(6): 2169–78. doi: 10.1007/s00464-015-4517-y.
37. Goh A.C., Goldfarb D.W., Sander J.C., Miles B.J., Dunkin B.J. Global evaluative assessment of robotic skills: validation of a clinical assessment tool to measure robotic surgical skills. *J. Urol.* 2012; 187(1): 247–52. doi: 10.1016/j.juro.2011.09.032.
38. Dubin A.K., Smith R., Julian D., Tanaka A., Mattingly P. A Comparison of Robotic Simulation Performance on Basic Virtual Reality Skills: Simulator Subjective Versus Objective Assessment Tools. *J. Minim Invasive Gynecol.* 2017; 24(7): 1184–9. doi: 10.1016/j.jmig.2017.07.019.
39. Kolontarev K.B., Sheptunov S.A., Prilepskaya, E.A., Maltsev E.G., Pushkar D.Yu. Simulators in training of robotic-assisted surgery (literature review). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Privolzhskiy region. Meditsinskie nauki.* 2016; 2(38): 116–31. (in Russian) DOI: 10.21685/2072-3032-2016-2-12.

Поступила 19.09.18

Принята в печать 16.11.18