

doi: 10.17116/neiro2016802102-107

Новые симуляционные технологии в нейрохирургии

Д.м.н. В.А. БЫВАЛЬЦЕВ¹⁻⁴, Е.Г. БЕЛЫХ¹, д.м.н. Н.А. КОНОВАЛОВ⁵

¹ФГБНУ «Иркутский научный центр хирургии и травматологии», Иркутск; ²НУЗ «Дорожная клиническая больница на ст. Иркутск-Пассажирский» ОАО РЖД, Иркутск; ³ГБОУ ВПО «Иркутский государственный медицинский университет» Минздрава России; ⁴ГБОУ ДПО «Иркутская государственная медицинская академия последипломного образования» Минздрава России; ⁵ФГАУ «НИИ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» (дир. — акад. РАН А.А. Потапов) Минздрава России, Москва

Представлены обзор литературы о современном состоянии симуляционных технологий в нейрохирургии; терминология и классификация симуляционных моделей; примеры симуляционных моделей и тренажеров навыков, используемых в нейрохирургии; основные физические модели для освоения навыков; спектр доступных компьютерных виртуальных тренажеров и их основные характеристики.

Полезными видятся включение микронеурохирургического тренинга и кадаверного курса нейрохирургических доступов в программы обучения нейрохирургии, а также расширение использования трехмерной визуализации. Перспективными являются технологии производства трехмерных анатомических моделей и пациент-специфических компьютерных тренажеров, совершенствование систем обратной тактильной связи и качества отображения виртуальных моделей. Непрерывное профессиональное образование предполагает исследования по оценке валидности и практической пользы симуляционных тренажеров и физических моделей.

Ключевые слова: симуляция, нейрохирургия, модели, образование, тренинг, микронеурохирургия.

New simulation technologies in neurosurgery

V.A. BYVALTSEV¹⁻⁴, E.G. BELYKH¹, N.A. KONOVALOV⁵

¹Irkutsk Scientific Center of Surgery and Traumatology; ²Irkutsk Railway Clinical Hospital, Irkutsk, Russia; ³State Medical University, Irkutsk, Russia; ⁴Irkutsk State Medical Academy of Continuing Education, Irkutsk, Russia; ⁵N.N. Burdenko Neurosurgery Research Institute, Moscow, Russia

The article presents a literature review on the current state of simulation technologies in neurosurgery, a brief description of the basic terminology and the classification of simulation models, and examples of simulation models and skills simulators used in neurosurgery. Basic models for the development of physical skills, the spectrum of available computer virtual simulators, and their main characteristics are described.

It would be instructive to include microneurosurgical training and a cadaver course of neurosurgical approaches in neurosurgery training programs and to extend the use of three-dimensional imaging. Technologies for producing three-dimensional anatomical models and patient-specific computer simulators as well as improvement of tactile feedback systems and display quality of virtual models are promising areas. Continued professional education necessitates further research for assessing the validity and practical use of simulators and physical models.

Keywords: simulation, neurosurgery, models, education, training, microneurosurgery.

Симуляционное обучение в медицине — относительно новое направление, получившее активное развитие в последние несколько лет [1, 2]. Значимость симуляционных технологий для нейрохирургии как области научных знаний и практической специальности не вызывает сомнений [3]. Тем не менее следует обозначить те актуальные проблемы нейрохирургии, где внедрение симуляционных технологий представляется особенно полезным и имеет значительный потенциал для дальнейшего развития.

Согласно приказу Минздравсоцразвития России №1475н от 05.12.11, на обучающий симуляционный курс отводится 136 ч в ординатуре. По данным Российского общества симуляционного обучения в медицине (РОСОМЕД) 2014 г., в России существует около 50 симуляционных центров, а до 2017 г. планируется создать не менее 80. По ключевым словам «симуляция», «нейрохирургия» в

базах данных Pubmed и Elibrary находятся более 1500 статей, количество публикаций за год по данной теме увеличивается.

Цель данного обзора — исследование современного состояния симуляционных технологий в нейрохирургии.

Термины и классификации

Симуляция в данном контексте — это имитация, моделирование, реалистичное воспроизведение процесса.

Предлагаемая классификация симуляционных моделей нейрохирургических операций (тренажеры навыков):

1. Физические (материальные) [1].

1.1. Тканевые:

а) живые (лабораторные животные);

б) тканевые (кадаверная диссекция, куриное крыло, плацента).

1.2. Искусственные (синтетические протезы, фантомы, муляжи).

2. Виртуальные (виртуальные тренажеры).

2.1. Модели дополненной реальности.

2.2. Полностью виртуальные модели.

Симуляции, основанные на физических моделях, имеют ограниченное значение в воссоздании всего медицинского вмешательства, но могут быть полезны для симуляции отдельных его этапов [4]. Различают симуляцию части вмешательства (англ. part-task simulation) и симуляцию всей операции полностью (англ. procedural simulation).

Симуляционные модели на биологическом материале включают использование широкого спектра материала. Например, для практики микронейрохирургических навыков давно используют лабораторных крыс и мышей [5]. Практику лапароскопических и торакокопических, эндовазальных и краниальных вмешательств *in vivo* осуществляют на свиньях [6]. Кадаверная диссекция является одной из форм симуляции и активно используется в нейрохирургическом образовании со времен Ренессанса [7].

Компьютерные тренажеры основаны на создании трехмерной или двухмерной виртуальной модели, имитирующей морфологию, заболевание, физиологическое состояние, диагностическую манипуляцию или оперативное вмешательство. Одно из понятий виртуальной симуляции — гаптика. *Гаптика* (от греч. *hapto* — касаюсь, хватаю) — это возможность получения тактильной обратной связи в симуляторе. *Дополненная реальность* создается реальными физическими объектами, отображаемыми на экране или в очках, когда на них проецируется изображение, смоделированное компьютером [8, 9].

Важным является разработка полезных и практических симуляционных моделей, для которых необходимо доказать валидность [10]. *Валидный* [от фр. *valide* — важный, действующий] — действительный, действенный, соответствующий требованиям [11]. *Валидность* — эффективность использования симулятора или симуляционной методики, подтвержденная согласно принципам доказательной медицины [12].

Глобальный подход к симуляционному обучению в нейрохирургии

На основании предварительного опыта курсов для пилотов [13], Общество неврологических хирургов США разработало официальный ежегодный курс обучения — «курс молодого бойца» для резидентов первого года [14]. На курсе изучается техника выполнения различных вмешательств:

- 1) пункция вентрикулоперитонеальной шунтирующей системы и программирование клапана;
- 2) установка люмбального дренажа;
- 3) установка датчика внутричерепного давления;
- 4) наружное вентрикулярное дренирование;
- 5) катетеризация центральных вен и артерий;
- 6) отработка действий в критических ситуациях (6 симуляций, основанных на моделях);
- 7) использование хирургического микроскопа и инструментов;
- 8) виды укладок пациента на операционном столе;
- 9) этапы краниотомии при черепно-мозговой травме для удаления субдуральной гематомы: использование дре-

ли, создание костного лоскута, вскрытие и ушивание ТМО, фиксация костного лоскута и ушивание кожи.

Полезным может стать проведение подобных курсов в масштабах федеральных округов под эгидой ассоциации нейрохирургов в крупных симуляционных центрах.

Далее в обзоре описаны основные симуляционные модели в различных направлениях нейрохирургии.

Дебрифинг и симуляция нейрохирургических пациентов

В нейрохирургии, так же как и в других сферах деятельности с высокими рисками, успех вмешательства зачастую связан с нетехническими аспектами — такими как оптимальная командная работа, лидерство, ситуационная осведомленность, принятие решения и межличностные коммуникации [15]. Показано, что множество нежелательных событий обусловлены человеческим фактором, и многие ошибки могут быть предотвращены с помощью эффективной командной работы [16]. Так, S. Harnof и соавт. [16] представили результаты симуляционного обучения коммуникационным навыкам нейрохирургов посредством сценариев с участием актеров. Сценарии включают получение информированного добровольного согласия на вмешательство, беседу при выписке пациента, информирование об интраоперационном осложнении, информирование родителей об опухоли головного мозга у ребенка, о смерти мозга. Проработка подобных сценариев на национальном уровне, вероятно, станет обязательной частью программы нейрохирургической резидентуры в Израиле.

Лаборатория трупной диссекции в нейрохирургии

По данным опроса V. Kshetry [17], 95,4% руководителей нейрохирургических программ в США уверены, что лабораторная диссекция должна быть обязательной составляющей образовательной программы по нейрохирургии; при этом ни один респондент не посчитал виртуальную симуляцию способной принести большую пользу, чем лабораторная диссекция. В настоящее время в России актуальной проблемой остаются юридические и технические возможности обеспечения кадаверами секционных залов медицинских университетов. Имеется дефицит качественно приготовленных инъецированных препаратов, которые возможно использовать для обучения и разработки различных краниальных доступов, в научных целях [18]. С другой стороны, заменой им в какой-то мере должны послужить физические и виртуальные 3D-модели.

Симуляция краниотомии

Распространенной моделью для тренировки навыков работы высокоскоростной дрелью является лопатка коровы. Этот материал наиболее доступный, дешевый и безопасный. Для тренировки различных нейрохирургических навыков фиксации костного лоскута, краниопластики и нейронавигации используются различные модели черепа (Sawbones, Kezlex и др.) [19]. Для практики ушивания краниотомной раны используется модель черепа с искусственной кожей, по строению схожей с мягкими тканями черепа. Например, «курс молодого бойца» для ординаторов включает симуляцию клинического случая: поступает сообщение о внезапном ухудшении состояния «пациента» в реанимации из-за нарастающей травматической внутричерепной гематомы и в условиях учебной опе-

рационной на манекене выполняется декомпрессивная краниотомия.

Нейроэндоскопия

R. Sierra и соавт. [20] одними из первых представили симуляционный фантом желудочковой системы с возможностью виртуального пациент-специфичного предоперационного тренинга и «интраоперационной» навигации для изучения вентрикулоскопических операций.

Разработка симуляционных моделей эндоскопической трансназальной хирургии также весьма актуальна. В настоящее время известны виртуальные компьютерные модели (NeuroTouch), физические модели на основе полимерного балзамирования [18] и фантомы для отработки трансназальных трансфеноидальных и вентрикулярных эндонейрохирургических навыков. Например, тренажер S.I.M.O.N.T. позволяет изучать хирургическую анатомию желудочковой системы, тренировать навыки эндоскопической риносинусохирургии и трансфеноидального доступа [21]. В Стенфордском университете разрабатываются виртуальные симуляторы пациент-специфичной эндоскопической анатомии параназальных синусов, а также хирургии височной кости [22].

Наложение микроанастомозов

Для тренировки навыков наложения микроанастомозов под настольным [23] или нейрохирургическим микроскопом предложено множество моделей: марля [24], силиконовые трубочки [25], сосуды крысы [5], сосуды плаценты [26], охлажденное крыло курицы или индейки [27]. Более сложными являются модели для практики наложения анастомозов в глубоком операционном поле [28, 29].

Арахноидальная диссекция и клипирование аневризм

Первоначальные навыки микронейрохирургии должны быть получены в условиях лабораторного тренинга [30, 31]. Так, T. Nidonmez и соавт. [32] описали модель микронейрохирургического тренинга на свежем головном мозге коровы для обучения манипуляциям микроинструментами и микродиссекции. Для развития навыков арахноидальной диссекции эффективна тренировка работы микроинструментами в разных направлениях на латексной перчатке под микроскопом, а также практика на других искусственных тканевых моделях [29] и лабораторных животных [6]. Для отработки навыков микродиссекции и клипирования аневризмы авторами разработана модель артериальной аневризмы на плаценте человека [33].

Ушивание ТМО

Модель включает тонкий лист искусственной ТМО, натянутой на мягкий силиконовый муляж головного мозга, находящийся в модели черепа, на которой отрабатывают наложение швов-держалок и ушивание ТМО в условиях механического ограничения костного окна [34]. Весьма полезна отработка навыков ушивания спинальной ТМО [35].

Пункция шунтирующего устройства

Симуляция заключается в пункции резервуара клапана с подключенной инфузией физиологического раствора. Затем проводится пункция тех же клапанов, но покрытых искусственной кожей, что позволяет пальпировать и

пунктировать резервуар, получая тактильную обратную связь, схожую с реальной.

Эндоваскулярная нейрохирургия

Для симуляции эндоваскулярных вмешательств применяют физические манекены и силиконовые модели [36] крупных лабораторных животных (свиньи) с хирургически сформированной аневризмой или артериовенозной мальформацией [37]. В последнее время популярность приобретают компьютерные виртуальные модели для симуляции эндоваскулярных вмешательств. Эндоваскулярные симуляторы включают модули для тренировки навыков широкого спектра интервенций на коронарных, периферических сосудах и аорте [38]. Церебральные модули имеются лишь в некоторых тренажерах. Важное преимущество таких тренажеров заключается в возможности имитировать артериотомии или основные их этапы, в наличии тактильной обратной связи, возможности изменять неврологические и физиологические гемодинамические показатели, измерять и оценивать навыки. Стоимость такого оборудования составляет порядка 2–11 млн руб. в зависимости от фирмы и программных модулей. Ежегодное обслуживание может стоить до 300 тыс. руб., дополнительные расходы включают страховку и обучение персонала. В нейрохирургической практике эндоваскулярные симуляторы позволяют тренировать навыки койлинга аневризм, установки стентов в церебральных и сонных артериях, баллонной ангиопластики, селективного введения лекарственных препаратов, а также тромбэктомии [39].

Люмбальная пункция

Для обучения люмбальной пункции разработаны физические манекены и виртуальные тренажеры с тактильной обратной связью [40].

Спинальная нейрохирургия

Для практики вмешательств на позвоночнике разработаны различные физические и виртуальные модели. T. Halic и соавт. [41] представили разработку симуляционного тренажера удаления грыжи диска на шейном уровне на основе дополненной реальности. Планирование вмешательства и тренировка мануальных навыков реализуются на физических трехмерных моделях из материала, схожего по структуре с костной тканью (Sawbones, США). Такие манекены валидизированы для практики фораминотомии и ламинотомии на шейном уровне [42], обучения оптимальной траектории установки транспедикулярных винтов [43]. Тренировка транспедикулярной фиксации и вертебропластики также доступна на виртуальных тренажерах Sensimmer [44]. Разрабатываются манекены для симуляции поясничной дискэктомии с возможностью резекции костной ткани, оценки натяжения нервных корешков, компрессии дурального мешка и кровотечения [45]. Новый симулятор 3S (Surgical Spine Simulator) для предоперационного планирования коррекции сколиотической деформации позволяет оценивать планируемый результат и напряжение в винтах фиксирующей системы [46]. Коробочный тренажер с фиксированным позвоночником кадавера или лабораторного животного позволяет тренировать навыки минимально инвазивных вмешательств [47].

Компьютерные симуляционные тренажеры

Neuro Touch является одним из первых виртуальных тренажеров. В настоящее время он позволяет практиковать базовые мануальные навыки работы наконечником аспиратора, ультразвуковым деструктором-аспиратором и биполярным пинцетом, а также оценивать фундаментальные принципы гемостаза, эндоназальной навигации, вентрикулостомии. Кроме того, доступны модули для симуляции операций резекции менингиомы и глиомы. При контакте с ригидными или эластичными структурами их сопротивление имитируется системой тактильной обратной связи, как и в других виртуальных тренажерах.

Другой компьютерный виртуальный 3D-симулятор с обратной связью Immersivetouch Sensimmer («Immersivetouch», США) позволяет тренировать навыки краниотомии, установки вентрикулярного катетера, ризотомии. В тренажере доступны модули люмбальной пункции, установки транспедикулярных винтов, вертебропластики и ряда других симуляционных операций [44].

Dextroscope («Вгассо АМТ Inc.», США) представляет собой рабочую станцию, способную к трехмерной реконструкции цифровых медицинских изображений и симуляции различных нейрохирургических вмешательств, в том числе удаления опухолей, клипирования аневризм [48] и диссекции виртуальной височной кости [8]. Изображение экрана отражается в зеркале и посредством затворных очков, синхронизированных с экраном, воспринимается как объемное. К сожалению, недостатком этой системы является отсутствие тактильной обратной связи. Фирма «Вгассо» разрабатывает устройства и программное обеспечение виртуальной реальности, пациент-специфичных волюметрических изображений для редактирования и презентации с помощью Dextrobeam [49]. Продолжением разработок является создание Dex-gau — системы дополненной реальности для хирургических вмешательств. Устройство состоит из отслеживаемого в пространстве зонда, в который интегрирована миниатюрная видеокамера. Камера получает изображение операционного поля с кончика зонда. Видеоизображение с камеры дополняется мультимодальной трехмерной графикой и ориентирами, полученными в ходе предоперационного планирования на рабочей станции Dextroscope, и обеспечивает «сквозное» видение [9, 50].

Недавно разработанный тренажер Su Rgical Planner («Surgical Theater», США) позволяет строить виртуальные трехмерные реконструкции для симуляции клипирования церебральных аневризм. Особенностью данного тренажера является возможность проведения дистанционного обучения и совместной удаленной работы на одном тренажере [51].

Создание пациент-специфичных моделей

Разработка пациент-специфичных трехмерных реконструкций для обучения и предоперационных тренировок является будущим виртуальных хирургических симуляторов [52], однако их внедрение потребует значительного времени. В настоящее время уже реализуются проекты по интеграции данных пациентов, например симуляция клипирования аневризмы на тренажерах Destroscope, Surgical Rehearsal Platform и резекция опухоли на тренажере NeuroTouch.

Современное программное обеспечение позволяет производить автоматическое и точное объемное воссозда-

ние нормальной и патологической анатомии пациентов, используя данные аппаратных исследований (КТ, МРТ, ЦСА) [53]. Создаваемые цифровые трехмерные изображения возможно редактировать и использовать для планирования и репетиций различных операций [54]. Технологии быстрого прототипирования (3D-принтеров) обеспечивают печать объемных анатомических моделей для планирования доступа и физической симуляции предстоящего вмешательства с учетом анатомии костей черепа, сосудов, оболочек и ткани головного мозга [55]. Другим полезным и перспективным методом является создание трехмерных фото- и видеоатласов микронейрохирургических доступов [56].

Полисенсорная обратная связь в компьютерных тренажерах

Все виртуальные нейрохирургические тренажеры состоят из трех основных компонентов: манипулятора с обратной тактильной связью (так называемого «сенсорного скульптора», «гаптик-стилуса»); системы для отображения трехмерного изображения; мощного компьютера со специфическим программным обеспечением. Точность позиционирования манипуляторов, например Geomagic Touch, достигает 0,023 мм, а максимальная нагрузка — 7,9 Н.

В перспективе планируется создание более дешевых и совершенных виртуальных тренажеров и роботов по гаптик-технологии. Например, в Токийском технологическом институте с использованием вышеупомянутого гаптик-стилуса ведется исследование хирургического робота IBIS [57], который может составить конкуренцию роботу da Vinci по качеству — наличию тактильной обратной связи, а также по цене.

Направления для дальнейших исследований и развития симуляционных технологий в нейрохирургии

Симуляционные технологии обладают значительными перспективами развития в области нейрохирургии благодаря тому, что предоставляют возможность для лучшего понимания пространственных взаимоотношений на трехмерных изображениях, что важно не только для обучения, но и для планирования деталей вмешательства. Технологии дополненной реальности обеспечивают «проецирующее» зрение, расширяя потенциал интраоперационной навигации [58].

Высокая сложность и разнообразие видов нейрохирургических вмешательств создают трудности при разработке симуляционных моделей, но за последние несколько лет в этом направлении достигнут значительный прогресс. В разных уголках мира нейрохирургами в сотрудничестве с инженерами разработаны различные симуляционные модели, которые служат развитию мастерства начинающих и практикующих нейрохирургов — от основных навыков вентрикулопункции, краниотомии и до более сложных навыков диссекции опухолей, хирургии основания черепа, эндонейрохирургии, сосудистой микронейрохирургии. Студенты и ординаторы имеют возможность приобретать новые навыки на простейших моделях. Более адекватные физические и виртуальные модели способствуют профессиональному развитию, освоению и совершенствованию оперативной техники даже опытными нейрохирургами [59].

Сравнивая пути развития симуляционного направления в других областях медицины, можно предположить, что перспективой является централизация и стандартизация образовательных программ в нейрохирургии. Полезными видятся включение микронейрохирургического тренинга и кадаверного курса нейрохирургических доступов в программы обучения и усовершенствования по специальности «Нейрохирургия», а также расширение использования трехмерной (микроскопической и эндоскопической) визуализации в практике и образовательном процессе. В методологическом аспекте актуальной является разработка стандартов компетентностного подхода к оценке экспертности и валидных квалиметрических тестов.

Учитывая дороговизну виртуальных компьютерных моделей, особо важной следует признать разработку дешевых физических моделей для отработки специфиче-

ских нейрохирургических навыков микродиссекции, анастомозирования, внутрижелудочковой и трансфеноидальной эндоскопической хирургии. Перспективными являются научно-технические разработки импортозамещающих технологий производства пациент-специфичных физических моделей и виртуальных тренажеров, совершенствование систем обратной тактильной связи и повышение качества фотографического отображения виртуальных моделей. С позиций доказательственности необходимы исследования по оценке валидности и практической пользы симуляционных тренажеров и физических моделей.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации СП-156.2013.4.

Конфликт интересов отсутствует.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Симуляционное обучение в медицине.* Под ред. Свистунова А.А. М.: Изд-во Первого МГМУ им. И.М. Сеченова. 2013;288.
2. Kirkman MA, Ahmed M, Albert AF, Wilson MH, Nandi D, Sevdalis N. The use of simulation in neurosurgical education and training. *J Neurosurg.* 2014 Aug;121(2):228-246. doi: 10.3171/jns.131766.
3. Das P, Goyal T, Xue A, Kalatoor S, Guillaume D. Simulation Training in Neurological Surgery. *Austin J Neurosurg.* 2014;1(1):6.
4. Sturm LP, Windsor JA, Cosman PH, Cregan P, Hewett PJ, Maddern GJ. A systematic review of skills transfer after surgical simulation training. *Ann Surg.* 2008;248(2):166-179. doi: 10.1097/sla.0b013e318176bf24.
5. Heiner H, Karl P, Tilgner-Peter A. The technic of microvascular anastomoses: the rat as a model. *Z Exp Chir.* 1977;10(6):331-337.
6. Olabe J, Olabe J, Roda J. Microsurgical cerebral aneurysm training porcine model. *Neurol India.* 2011;59(1):78-81. doi: 10.4103/0028-3886.76872.
7. McLachlan JC, Patten D. Anatomy teaching: ghosts of the past, present and future. *Med Educ.* 2006;40(3):243-253. doi: 10.1111/j.1365-2929.2006.02401.x.
8. Kockro RA, Hwang PY. Virtual temporal bone: an interactive 3-dimensional learning aid for cranial base surgery. *Neurosurgery.* 2009;64(5 Suppl 2):216-229. doi: 10.1227/01.neu.0000343744.46080.91.
9. Kockro RA, Tsai YT, Ng I, Hwang P, Zhu C, Agusanto K, Hong LX, Serra L. Dex-ray: augmented reality neurosurgical navigation with a handheld video probe. *Neurosurgery.* 2009;65(4):795-807. doi: 10.1227/01.neu.0000343744.46080.91.
10. Aucar JA, Groch NR, Troxel SA, Eubanks SW. A review of surgical simulation with attention to validation methodology. *Surg Laparosc Endosc Percutan Tech.* 2005;15(2):82-89. doi: 10.1097/01.sle.0000160289.01159.0e.
11. Комлев Н.Г. *Словарь иностранных слов.* М.: ЭКСМО-Пресс. 2000;672.
12. Gurusamy KS, Aggarwal R, Palanivelu L, Davidson BR. Virtual reality training for surgical trainees in laparoscopic surgery. *Cochrane Database Syst Rev.* 2009;(1):CD006575. doi: 10.1002/14651858.cd006575.
13. Tsang PS, Vidulich MA, editors. Principles and Practice of Aviation Psychology. Boca Raton, FL. *CRC Press.* 2002;624. doi: 10.1080/10508414.2010.520579.
14. Selden NR, Orogitano TC, Burchiel KJ, Getch CC, Anderson VC, McCartney S, Abdulrauf SI, Barrow DL, Ehni BL, Grady MS, Hadjipanayis CG, Heilman CB, Popp AJ, Sawaya R, Schuster JM, Wu JK, Barbaro NM. A national fundamentals curriculum for neurosurgery PGY1 residents: the 2010 Society of Neurological Surgeons boot camp courses. *Neurosurgery.* 2012;70(4):971-981. doi: 10.1227/01.neu.0b013e31823d7a45.
15. *Human Factors in Patient Safety Review of Topics and Tools.* Report for Methods and Measures Working Group of WHO. Patient Safety. 2009.
16. Harnof S, Hadani M, Ziv A, Berkenstadt H. Simulation-based interpersonal communication skills training for neurosurgical residents. *Isr Med Assoc J.* 2013;15(9):489-492. doi: 10.1177/1553350608318142.
17. Kshetry VR, Mullin JP, Schlenk R, Recinos PF, Benzel EC. The Role of laboratory dissection training in neurosurgical residency: results of a national survey. *World Neurosurg.* 2014;26. doi: 10.1016/j.wneu.2014.05.028.
18. Гайворонский А.И. Сравнительная оценка и анатомо-экспериментальные обоснования эндовидеохирургических трансклиальных доступов: Дис. ... д-ра мед. наук. СПб. 2012.
19. Hofer M, Strauss G, Grunert R, Korb W, Müller E, Möckel H, Thalheim M, Trantakis CK, Dietz A, Lüth T. A pre-clinical evaluation of the navigated-control drill for surgery of the petrosal bone. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery.* 2006;1(1):320-321.
20. Sierra R, Dimaio SP, Wada J, Hata N, Székely G, Kikinis R, Jolesz F. Patient specific simulation and navigation of ventriculoscopic interventions. *Stud Health Technol Inform.* 2007;125:433-435. doi: 10.5759/jscas1999.9.85.
21. Filho FV, Coelho G, Cavalheiro S, Lyra M, Zymberg ST. Quality assessment of a new surgical simulator for neuroendoscopic training. *Neurosurg Focus.* 2011;30(4):E17. doi: 10.3171?2011.2.focus10321.
22. Parikh SS, Chan S, Agrawal SK, Hwang PH, Salisbury CM, Rafii BY, Varma G, Salisbury KJ, Blevins NH. Integration of patient-specific paranasal sinus computed tomographic data into a virtual surgical environment. *Am J Rhinol Allergy.* 2009;23(4):442-447. doi: 10.2500/ajra.2009.23.3335.
23. Inoue T, Tsutsumi K, Adachi S, Tanaka S, Saito K, Kunii N. Effectiveness of suturing training with 10–0 nylon under fixed and maximum magnification ($\times 20$) using desk type microscope. *Surg Neurol.* 2006;66(2):183-187. doi: 10.1016/j.surneu.2005.11.064.
24. Indo M, Tsutsumi K, Shin M. The practice of knots untying technique using a 10-0 nylon suture and gauze to cope with technical difficulties of microvascular anastomosis. *World Neurosurg.* 2011;75(1):87-89. doi: 10.1016/j.wneu.2010.07.030.
25. Matsumura N, Hayashi N, Hamada H, Shibata T, Horie Y, Endo S. A newly designed training tool for microvascular anastomosis techniques: Microvascular Practice Card. *Surg Neurol.* 2009;71(5):616-620. doi: 10.1016/j.wneu.2010.07.030.
26. Goldstein M. Use of fresh human placenta for microsurgical training. *J Microsurg.* 1979;1(1):70-71.
27. Abla AA, Uschold T, Preul MC, Zabramski JM. Comparative use of turkey and chicken wing brachial artery models for microvascular anastomosis training. *J Neurosurg.* 2011;115(6):1231-1235. doi: 10.3171/2011.7.jns102013.

28. Ishikawa T, Yasui N, Ono H. Novel brain model for training of deep microvascular anastomosis. *Neurol Med Chir. (Tokyo)*. 2010;50(8):627-629. doi: 10.2176/nmc.50.627.
29. Belykh E, Byvaltsev V. Off-the-job microsurgical training on dry models: Siberian experience. *World Neurosurg*. 2014;82(1-2):20-24. doi: 10.1016/j.wneu.2014.01.018.
30. Kitai R, Kikuta K. Off-the-job Neurosurgical training System at University of Fukui. *Jpn J Neurosurg*. 2010;19(5):388-394.
31. Бывальцев В.А., Сороковиков В.А., Белых Е.Г. *Микрохирургический тренинг в нейрохирургии*. Новосибирск: Наука. 2013;144.
32. Nidonmez T, Hamamcioglu MK, Tiryaki M, Cukur Z, Cobanoglu S. Microneurosurgical training model in fresh cadaveric cow brain: a laboratory study simulating the approach to the circle of Willis. *Surg Neurol*. 2006;66(1):100-104. doi: 10.1016/j.surneu.2005.09.027.
33. Белых Е.Г., Бывальцев В.А., Накаджи П., Леи Т., Оливейро М.М., Никифоров С.Б. Модель артериальной аневризмы головного мозга для микронейрохирургического тренинга. *Вопросы нейрохирургии*. 2014;2:40-45.
34. Anderson P. Surgical simulation: dural repair. *CNS Q*. 2011;16-17. doi: 10.1097/00006527-199717020-00005.
35. Ghobrial GM, Anderson PA, Chitale R, Campbell PG, Lobel DA, Harrop J. Simulated spinal cerebrospinal fluid leak repair: an educational model with didactic and technical components. *Neurosurgery*. 2013;73(Suppl 1):111-115. doi: 10.1227/neu.000000000000100.
36. Suzuki Y, Fujitsuka M, Chaloupka JC. Simulation of endovascular neurointervention using silicone models: imaging and manipulation. *Neurol Med Chir. (Tokyo)*. 2005;45(11):567-572. doi: 10.2176/nmc.45.567.
37. Wakhloo AK, Lieber BB, Siekmann R, Eber DJ, Gounis MJ. Acute and chronic swine rete arteriovenous malformation models: hemodynamics and vascular remodeling. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2005;26(7):1702-1706.
38. Neequaye SK, Aggarwal R, Van Herzele I, Darzi A, Cheshire NJ. Endovascular skills training and assessment. *J Vasc Surg*. 2007;46(5):1055-1064. doi: 10.1016/j.jvs.2007.05.041.
39. Dawson DL, Meyer J, Lee ES, Pevce WC. Training with simulation improves residents endovascular procedure skills. *J Vasc Surg*. 2007;45:149-154. doi: 10.1016/j.jvs.2006.09.003.
40. Färber M, Hoeborn E, Dalek D, Hummel F, Gerloff C, Bohn CA, Handels H. Training and evaluation of lumbar punctures in a VR-environment using a 6DOF haptic device. *Stud Health Technol Inform*. 2008;132:112-114.
41. Halic T, Kockara S, Bayrak C, Rowe R. Mixed reality simulation of rasping procedure in artificial cervical disc replacement (ACDR) surgery. *BMC Bioinformatics*. 2010;11(Suppl 6):11. doi: 10.1186/1471-2105-11-s6-s11.
42. Harrop J, Rezaei AR, Hoh DJ, Ghobrial GM, Sharan A. Neurosurgical training with a novel cervical spine simulator: posterior foraminotomy and laminectomy. *Neurosurgery*. 2013;73(Suppl 1):94-99. doi: 10.1227/neu.000000000000103.
43. Chitale R, Ghobrial GM, Lobel D, Harrop J. Simulated lumbar minimally invasive surgery educational model with didactic and technical components. *Neurosurgery*. 2013;73(Suppl 1):107-110. doi: 10.1227/neu.000000000000091.
44. Alaraj A, Charbel FT, Birk D, Tobin M, Luciano C, Banerjee PP, Rizzi S, Sorenson J, Foley K, Slavin K, Roitberg B. Role of cranial and spinal virtual and augmented reality simulation using immersive touch modules in neurosurgical training. *Neurosurgery*. 2013;72(Suppl 1):115-123. doi: 10.1227/neu.0b013e3182753093.
45. Adermann J, Geissler N, Bernal LE, Kotsch S, Korb W. Development and validation of an artificial wetlab training system for the lumbar discectomy. *Eur Spine J*. 2014;23(9):1978-1983. doi: 10.1007/s00586-014-3257-3.
46. Aubin CE, Labelle H, Chevrefils C, Desroches G, Clin J, Eng AB. Preoperative planning simulator for spinal deformity surgeries. *Spine. (Phila Pa 1976)*. 2008;33(20):2143-2152. doi: 10.1097/brs.0b013e31817bd89f.
47. Walker JB, Perkins E, Harkey HL. A novel simulation model for minimally invasive spine surgery. *Neurosurgery*. 2009;65(6 Suppl):188-195. doi: 10.1227/01.neu.0000341534.82210.1b.
48. Wong GK, Zhu CX, Ahuja AT, Poon WS. Craniotomy and clipping of intracranial aneurysm in a stereoscopic virtual reality environment. *Neurosurgery*. 2007;61(3):564-568. doi: 10.1227/01.neu.0000290904.46061.0d.
49. Serra L, Kockro R, Goh LC, Ng H, Lee EC. The DextroBeam: a stereoscopic presentation system for volumetric medical data. *Stud Health Technol Inform*. 2002;85:478-484.
50. Matis GK, Silva DO, Chrysou OI, Karanikas M, Pelidou SH, Birbilis TA, Bernardo A, Stieg P. Virtual reality implementation in neurosurgical practice: the «can't take my eyes off you» effect. *Turk Neurosurg*. 2013;25(5):690-691.
51. Bambakidis NC, Selman WR, Sloan AE. Surgical rehearsal platform: potential uses in microsurgery. *Neurosurgery*. 2013;73(Suppl 1):122-126. doi: 10.1227/neu.000000000000099.
52. Choudhury N, Gélinas-Phaneuf N, Delorme S, Del Maestro R. Fundamentals of neurosurgery: virtual reality tasks for training and evaluation of technical skills. *World Neurosurg*. 2013;80(5):e9-e19. doi: 10.1016/j.wneu.2012.08.022.
53. Willaert WI, Aggarwal R, Van Herzele I, Cheshire NJ, Vermassen FE. Recent advancements in medical simulation: patient-specific virtual reality simulation. *World J Surg*. 2012;36(7):1703-1712. doi: 10.1007/s00268-012-1489-0.
54. Mori K, Yamamoto T, Nakao Y, Esaki T. Development of artificial cranial base model with soft tissues for practical education: technical note. *Neurosurgery*. 2010;66(6 suppl operative):339-341. doi: 10.1227/01.neu.0000369664.24998.b6.
55. Oishi M, Fukuda M, Yajima N, Yoshida K, Takahashi M, Hiraishi T, Takao T, Saito A, Fujii Y. Interactive presurgical simulation applying advanced 3D imaging and modeling techniques for skull base and deep tumors. *J Neurosurg*. 2013;119(1):94-105. doi: 10.3171/2013.3.jns121109.
56. Bernardo A, Preul MC, Zabramski JM, Spetzler RF. A three-dimensional interactive virtual dissection model to simulate transpetrous surgical avenues. *Neurosurgery*. 2003;52(3):499-505. doi: 10.1227/01.neu.0000047813.32607.68.
57. Tadano K, Kawashima K, Kazuyuki K, Naofumi T. Development of a pneumatic surgical manipulator IBIS IV. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2010;22(2):179-187. doi: 10.1163/016918610x522559.
58. Mahwash M, Besharati TL. A novel augmented reality system of image projection for image-guided neurosurgery. *Acta Neurochir. (Wien)*. 2013;155(5):943-947.
59. Porte MC, Xeroulis G, Reznick RK, Dubrowski A. Verbal feedback from an expert is more effective than self-accessed feedback about motion efficiency in learning new surgical skills. *Am J Surg*. 2007;193(1):105-110. doi: 10.1016/j.amjsurg.2006.03.016.