

DOI: 10.15690/vramn681

В.А. Бывальцев^{1, 2, 3}, А.А. Калинин^{1, 2}, Е.Г. Белых^{1, 3}, И.А. Степанов¹

¹ Иркутский государственный медицинский университет, Иркутск, Российская Федерация

² Дорожная клиническая больница на ст. Иркутск-Пассажи́рский, Иркутск, Российская Федерация

³ Иркутский научный центр хирургии и травматологии, Иркутск, Российская Федерация

Симуляционные технологии в спинальной хирургии

Представленный обзор литературы отражает современное состояние симуляционных технологий в нейрохирургии и в частности в спинальной хирургии. В настоящее время существуют различные виды технических приложений, используемых в хирургии позвоночника, среди которых выделяют биологические, искусственные и виртуальные модели. Это способствует оптимальному изучению анатомии, пониманию пространственных взаимоотношений органов и тканей, правильному планированию этапов оперативного вмешательства, получению тактильных навыков. Внедрение симуляционных технологий в процесс обучения позволяет объективно оценивать исходный уровень профессиональной подготовки, повышать уровень компетенции специалистов, а также предупреждать ошибочные действия врачей в различных клинических ситуациях.

Ключевые слова: симуляционные технологии, нейрохирургия, спинальная хирургия, модели, тренинг.

(Для цитирования: Бывальцев В.А., Калинин А.А., Белых Е.Г., Степанов И.А. Симуляционные технологии в спинальной хирургии. Вестник РАМН. 2016;71(4):297–303. doi: 10.15690/vramn681)

Актуальность

В последние несколько лет в отечественном медицинском сообществе активно обсуждается проблема внедрения симуляционных технологий в процесс обучения врачей различных специальностей, в том числе для оказания пациентам специализированной и высокотехнологичной помощи [1]. Симуляционные технологии играют важную роль в обучении студентов медицинских вузов, так как представляют собой идеальный способ получения практического опыта в безопасных для здоровья пациента условиях [2]. Тренинг на симуляционных моделях и платформах представляет собой рациональный и практичный подход к приобретению и совершенствованию навыков во многих медицинских направлениях, в том числе и в спинальной хирургии.

Актуальность использования симуляционного тренинга в спинальной хирургии не вызывает сомнений. Так, активное внедрение современных лечебно-диагностических нейрохирургических методик объективно повышает потребность в квалифицированных кадрах, способных эффективно применять высокотехнологичное оборудование. Установлено, что тренинг на симуляционных моделях значительно повышает эффективность использования таких технологий в практическом здравоохранении [3]. Современные высокотехнологичные опе-

рации на позвоночном столбе и спинном мозге, так же как и интракраниальные вмешательства, требуют высокого уровня специализированного обучения, реализуемого в том числе и на муляжах, фантомах, манипуляционных тренажерах, симуляционных моделях [3, 4].

Симуляция предоставляет хорошую возможность для репетиции предстоящего оперативного вмешательства и позволяет нейрохирургу выработать четкую стратегию хода операции и ее непосредственного выполнения на персонализированных физических или виртуальных моделях. Работая с симуляционным тренажером, нейрохирург имеет право на ошибку, что позволяет проанализировать причину таковой и избежать ее повторения в реальных условиях. Также возможно сфокусироваться на определенных компонентах сложного навыка, чтобы научиться выполнять их на высоком уровне [4, 5].

Симуляционные технологии — это перспективное инвестиционное направление. По данным Российского общества симуляционного обучения в медицине (РОСО-МЕД), по состоянию на 2014 г. в стране создано около 50 симуляционных центров, а к концу 2017 г. планируется организовать не менее 80 [6–8].

По ключевым словам «симуляция», «спинальная хирургия» в базе данных Pubmed найдено более 600 работ; с каждым годом наблюдается рост числа публикаций по данной теме, составляющий порядка 50–60 работ в год с

297

V.A. Byvaltsev^{1, 2, 3}, A.A. Kalinin^{1, 2}, E.G. Belykh^{1, 3}, I.A. Stepanov¹

¹ Irkutsk State Medical University, Irkutsk, Russian Federation

² Railway Clinical Hospital on the Station Irkutsk-Passazhirskiy of Russian Railways Ltd., Irkutsk, Russian Federation

³ Irkutsk Scientific Center of Surgery and Traumatology, Irkutsk, Russian Federation

Simulation Technologies in Spinal Surgery

This review reflects the current state of simulation technologies in neurosurgery and, in particular, in spinal surgery. Currently, there are different types of simulations used in spine surgery including the biological, artificial and virtual models. Simulations help to facilitate an optimal study of the anatomy, understand the spatial relationships between organs and tissues, plan properly the surgical intervention, and gain tactile surgical skills. The implementation of simulation technologies in the educational process provides objective assessment of the initial level of training, improvement of the competence in trained professionals, as well as prevention of surgical errors in various clinical situations.

Key words: simulation technologies, neurosurgery, spinal surgery, models, training.

(For citation: Byvaltsev VA, Kalinin AA, Belykh EG, Stepanov IA. Simulation Technologies in Spinal Surgery. Annals of the Russian Academy of Medical Sciences. 2016;71(4):297–303. doi: 10.15690/vramn681)

максимальным пиком в 2012 году и формированием стойкого плато с 2013 года (рис. 1).

Цель настоящего обзора — анализ современных литературных данных о применении симуляционных технологий в спинальной хирургии.

История развития симуляционных технологий в медицине

Знание истории симуляционных технологий позволяет более осознанно оценить уровень развития современных методик. Научно-технический прогресс способствует совершенствованию многих отраслей науки, в том числе и симуляционного тренинга. Так, новые разработки в области химии обеспечили появление тренажеров из пластика и силикона, а развитие компьютерных технологий заложило научно-технический фундамент для виртуальных симуляторов.

Первые упоминания о трупной диссекции в обучении врачей принадлежат греческому ученому-медику Клавдию Галену (Claudius Galenus, II век н.э.). Фантомы родов были изобретены во Франции в начале XVIII века. Петер Сафар (P. Safar) разработал основные принципы сердечно-легочно-мозговой реанимации и убедил норвежского производителя резиновых игрушек Асмунда Лаэрдала (A. Laerdal) изготовить ставший впоследствии знаменитым манекен «Annie» (США, Норвегия, 1960-е гг.). Позже Майкл Гордон (M. Gordon) изготовил манекен для обучения исследованию сердечно-сосудистой и дыхательной системы (США, 1968). С помощью созданного в 1986 г. в Стэнфордском университете под руководством Дэвида Габа (D. Gabb) анестезиологического симулятора пациента «CASE» Гарвардской школы медицины были получены убедительные доказательства эффективности обучающих симуляционных технологий. В 1993 г. открылся центр медицинской симуляции в Гарварде.

Создание первого в мире виртуального симулятора для хирургических манипуляций стало заслугой Ричарда Сатавы (R. Satawa) [9]. Первые нейрохирургические симуляторы были изготовлены в начале 90-х годов прошлого столетия и позволили отрабатывать базовые навыки в нейрохирургии. На сегодняшний день симуляционный

тренинг в нейрохирургии представлен широким спектром технологий в области краниальной, микрососудистой хирургии, нейроэндоскопии и др. Что касается развития симуляционных технологий в области спинальной хирургии, то за последние несколько лет отмечается активное развитие этого направления, что подтверждается многочисленными публикациями и монографиями по данной тематике [10, 11].

Виды симуляционных технологий, применяемых в спинальной хирургии

Современные симуляционные модели, применяемые в спинальной хирургии, представлены несколькими видами. Среди таких моделей наиболее распространены физические (тканевые и искусственные) и виртуальные (полностью виртуальные и модели с дополненной реальностью) [12]. Каждый вид симуляционной модели имеет свои достоинства и недостатки. Например, тренинг на физической модели полезен при отработке отдельных этапов оперативного вмешательства, однако имеет ограниченное применение в воссоздании всего медицинского вмешательства. Компьютерные тренажеры основаны на создании виртуальной модели, которая имитирует патологическое состояние, диагностическую процедуру или оперативное вмешательство. Использование такого рода тренажеров позволяет обучиться практически всем видам манипуляций в спинальной хирургии. При этом высокая стоимость компьютерных тренажеров и малая приближенность моделей к реальной клинической ситуации ограничивают их широкое применение в процессе обучения [13, 14].

Кадаверные симуляционные модели

Известно, что использование кадаверного материала в качестве симуляционных моделей в хирургии насчитывает столетия [15]. Именно возможность изучения топографической анатомии трупа сыграла огромную роль в обучении хирургов и врачей в целом. Более 80% опрошенных руководителей программ обучения неврологических хирургов в США и Западной Европе высказали мнение о необходимости широкого использования ка-

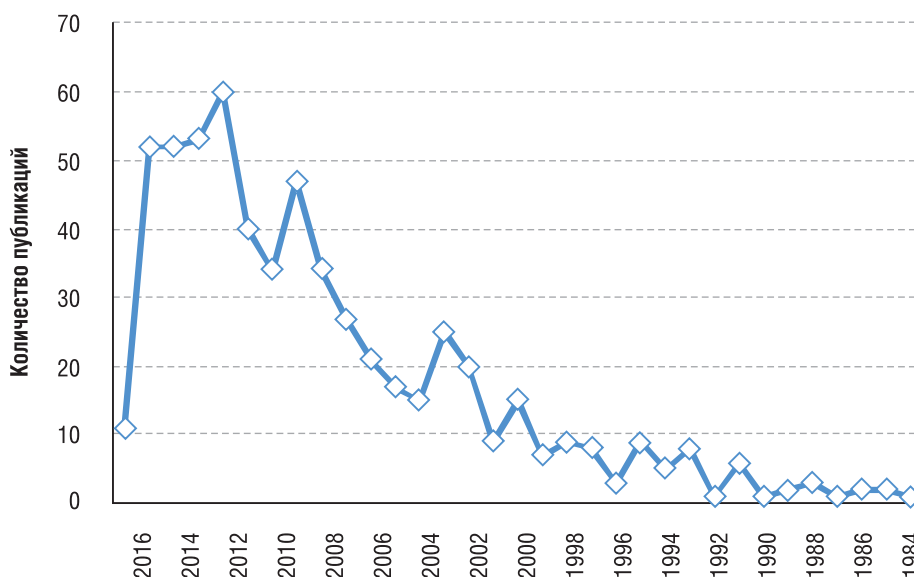


Рис. 1. Количество публикаций, рецензируемых в Pubmed, найденных по ключевым словам «spinal surgery», «simulation», «models», «training» за период 1984–2016 гг.

даверного материала в качестве симуляционных моделей для отработки основных процедур и манипуляций [16]. Проведение такого обучения на трупном материале затрагивает правовые, этические и финансовые вопросы. Во многих странах, в том числе и в России, ряд факторов ограничивает использование кадаверного материала в обучении: сложности правового регулирования, отсутствие сложившихся этических представлений в обществе, а также отсутствие служб для получения, хранения, транспортировки и захоронения материала с достойным обращением и соблюдением всех этических норм. В ряде стран в рамках правового поля создана инфраструктура для обеспечения медицинских учебных заведений кадаверным материалом. В данном аспекте основным вопросом рассматривается финансирование с целью поддержания работы указанной структуры. Так, в США при такой форме организации затраты на один кадавер могут достигать десятка тысяч долларов.

Заменой человеческому кадаверному материалу в определенных нормах права и этики пределах могут служить животные модели. В некоторые программы обучения спинальных хирургов США включены тренинги на моделях позвоночников овцы, телянка и олень [17]. М. Kalayci с соавт. [18] предложили методику обучения классической дискэктомии на позвоночнике телянка. В 2009 г. J. Walker с соавт. [19] сообщили о создании набора для отработки навыков в области минимально-инвазивной спинальной хирургии (Minimally Invasive Spine Surgery, MISS) на позвоночнике свиньи. Позже А. Alaraj с соавт. описали две симуляционные модели — ушивание твердой мозговой оболочки и ламинопластику [20]. Симуляционная модель ушивания твердой мозговой оболочки выглядела следующим образом: два катетера Фолея вводили в эпидуральное пространство для нагнетания физиологического раствора под давлением не менее 90 мм рт.ст., затем проводили ламинэктомию и разрез твердой мозговой оболочки. После этого учащийся выполнял ушивание твердой мозговой оболочки, герметичность шва проверялась нагнетанием раствора. В своем исследовании Н. Suslu с соавт. подробно описали использование симуляционной модели позвоночника овцы для отработки поясничной дискэктомии, транспедикулярной фиксации, а также чрескожных трансфораминальных вмешательств на поясничном отделе позвоночника [21].

Искусственные симуляционные модели

Искусственные симуляционные модели включают в себя различные синтетические протезы, фантомы, муляжи. К настоящему времени разработаны искусственные модели для работы в различных областях медицины, в том числе и в спинальной хирургии. Такое бурное развитие искусственных моделей связано с появлением 3D-принтеров, которые позволяют с максимальной точностью создать любую анатомическую структуру человеческого организма по данным магнитно-резонансной или компьютерной томографии (МРТ, КТ). Наиболее технически простым является 3D-печать костных структур по данным КТ [22].

Среди распространенных искусственных моделей для спинального тренинга следует отметить американскую разработку отделения нейрохирургии Университета штата Иллинойс и механического конструкторского бюро Брэдли, которая представляет собой симуляционную модель пояснично-крестцового отдела позвоночника ребенка [23]. Тренажер создан из различных синтетических материалов, что отражает разную степень упругости и эластичности структур модели позвоночника. Данный

тренажер может быть использован для имитации оперативного вмешательства при различных аномалиях позвоночника у детей (*spina bifida*, тотальное или частичное слияние смежных позвонков, спондилолистез и др.). Кроме того, указанная модель может быть использована при симуляции микродискэктомии и переднего межтелового спондилодеза. В 2012 г. Общество неврологических хирургов предложило свою модель для симуляции переднего межтелового спондилодеза [24, 25].

Планирование вмешательства и тренировка мануальных навыков реализуются также на физических 3D-моделях из материала, подобного по структуре костной ткани (Sawbones, США). Такие манекены рекомендованы для практики фораминотомии и ламинотомии на шейном уровне [25], обучения оптимальной траектории установки транспедикулярных винтов. Стоит отметить еще одну симуляционную модель для спинального тренинга — DURA-GUARD (Synovis Surgical, США), представляющую собой тонкий лист искусственной твердой мозговой оболочки, на которой отрабатывают наложение швов-держалок и ушивание оболочки в условиях механического ограничения костного окна [26].

Виртуальные симуляционные модели

Виртуальные симуляционные модели обладают огромным потенциалом, и, возможно, в будущем они станут основным методом обучения в медицине [27]. На сегодняшний день виртуальные технологии в спинальной хирургии пока находятся на начальном этапе своего развития, тем не менее уже создано несколько уникальных тренажеров, симулирующих полноценные оперативные вмешательства на позвоночнике и спинном мозге. Среди таких тренажеров следует отметить устройство Immersive Touch (Immersive Touch, Inc., США), с помощью которого возможна отработка навыков люмбальной пункции, винтовой фиксации, чрескожных вмешательств на позвоночнике, а также вертебропластики [28]. Также заслуживает внимания разработка Сингапурской компании — тренажер Dextroscope (Volume Interactions Ltd., Сингапур) [29], предназначенный для предоперационного планирования всех этапов оперативного вмешательства на позвоночнике. Планирование достигается путем создания точной 3D-модели зоны оперативного вмешательства. Схожей функцией предоперационного планирования обладает модель Surgical Rehearsal Platform (Surgical Theater, LLC., США): тренажер также создает максимально приближенную к реальности 3D-модель позвоночника пациента с помощью загружаемых в компьютерную программу файлов формата DICOM [29]. Среди других виртуальных моделей для спинального тренинга выделяются тренажер Sensimmer (Phascon Corporation, Германия), позволяющий выполнять транспедикулярную фиксацию, вертебропластику и новый симулятор 3S (Surgical Spine Simulator, США) для предоперационного планирования коррекции сколиотической деформации [30].

Пациентспецифичные модели для симуляционного тренинга

Будущее виртуальных нейрохирургических симуляторов за пациентспецифичными 3D-реконструкциями для обучения и предоперационных тренировок [31]. Но создание этих моделей и их внедрение в процесс обучения займет не одно десятилетие. Используя данные высокоточных инструментальных методов исследований (мультиспиральной компьютерной томографии, МРТ,

ангиографии) при помощи современных компьютерных технологий можно с легкостью воссоздавать нормальную и патологическую анатомию пациентов [32]. Получаемые цифровые 3D-изображения можно редактировать и использовать для планирования и симуляции различных оперативных вмешательств. Внедрение 3D-принтеров обеспечивает печать практически любых анатомических структур для планирования доступа и физической симуляции предстоящей операции с учетом анатомии костей и связочного аппарата, сосудов, оболочек и тканей головного и спинного мозга. Другим не менее важным и перспективным методом является создание 3D-видеоинструкций и фоторуководств по микро-нейрохирургии [33, 34].

Общие сведения об используемых симуляционных технологиях в спинальной хирургии представлены в табл.

Алгоритм микро-нейрохирургического тренинга

В основу организации современных нейрохирургических экспериментальных и симуляционных лабораторий в большинстве развитых стран положено согласие этического комитета больницы и/или университета. Лаборатория возглавляется квалифицированным хирургом (микро-нейрохирургом) с опытом и стажем работы, а ее деятельность координируется нейрохирургическим отделением больницы или кафедрой нейрохирургии университета. Поскольку другим клиническим или образовательным учреждениям предоставляется свободный доступ к ресурсам лаборатории при проведении тренинга, в ней устанавливается круглосуточный график работы (включая выходные дни), что позволяет более гибко сочетать обучающий курс среди различных специалистов и оптимизировать использование микроскопов (на сегодняшний день любая нейрохирургическая операция должна проводиться при помощи операционного микроскопа, а потому оптимизация использования этого прибора

является первоочередным этапом алгоритма микро-нейрохирургического тренинга) [35].

На основании полученных в ходе работы результатов, а также опыта, приобретенного при стажировках в микро-нейрохирургических лабораториях, разработаны основные составляющие успешного освоения и совершенствования микро-нейрохирургической техники. На сегодняшний день предложен алгоритм нейрохирургического обучения с использованием симуляционных моделей, который включает следующие основные составляющие: «сухой» постоянный тренинг для освоения основных навыков и их поддержания, работа в условиях лаборатории на биологической модели (рис. 2). В условиях лаборатории может проводиться периодический кадаверный курс, в ней же располагаются компьютерные тренажеры. Реальный нейрохирургический опыт, получаемый в операционной, должен поддерживаться анатомическими знаниями, полученными на кадаверных курсах. Выполнение плановых нейрохирургических вмешательств должно сочетаться с постоянным микрохирургическим тренингом для поддержания навыков, особенно в отношении тех операций, которые выполняются нерегулярно.

Перспективы развития симуляционных технологий в нейрохирургии

Возможность более точного понимания пространственных взаимоотношений на 3D-моделях является важным аспектом в обучении и планировании деталей оперативного вмешательства. Технологии дополненной реальности позволяют расширить потенциал интраоперационной навигации в спинальной хирургии [36, 37]. Нейрохирурги разных стран лично принимают участие в разработке симуляционных моделей. Воплощенные в реальность тренажеры служат развитию навыков у начинающих и мастерства у практикующих специалистов — от базовых умений люмбальной пункции, ламинэктомии, краниотомии до диссекции опухолей, хирургии основа-

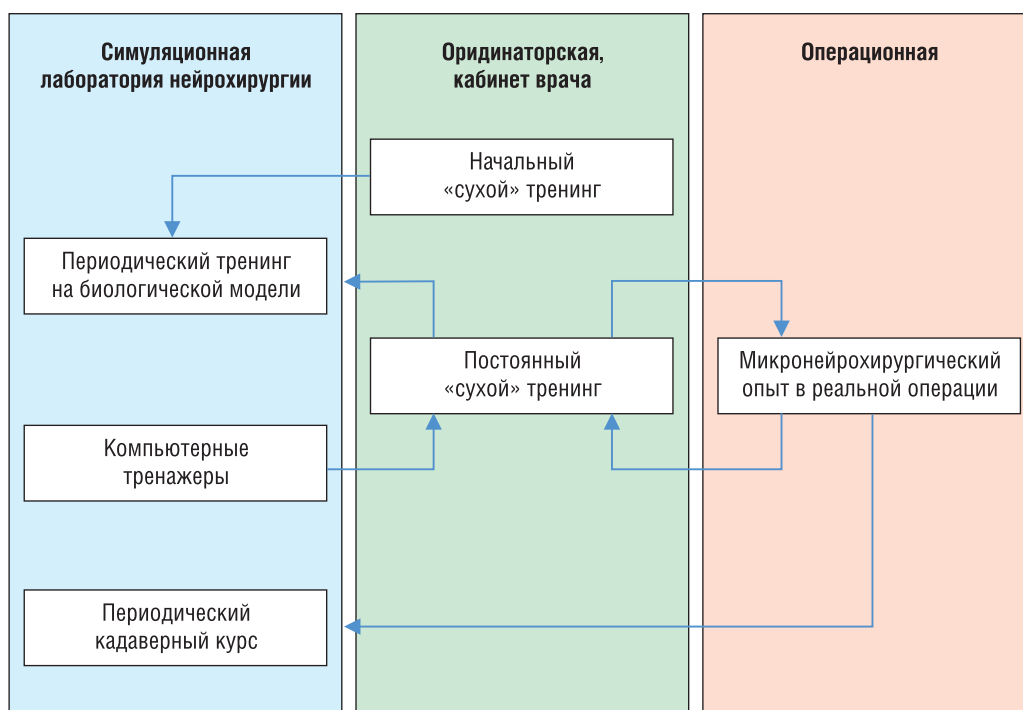








Рис. 2. Алгоритм микро-нейрохирургического тренинга

Таблица. Общие сведения о симуляционных моделях в спинальной хирургии

Тип симуляции	Цель симуляции	Производитель	Название	Фотоизображение тренажера	Ориентировочная стоимость	Тактильная обратная связь	Пациент-специфичность
Физический	Люмбальная пункция	Mitmanekovov.ru Sawbones, США	Тренажер для выполнения люмбальной пункции		90 750,00 руб.	Да	Нет
Виртуальный	Виртуальный тренажер краниальных и спинальных операций	National Research Council, Канада	Симулятор Neuto Touch		Ориентировочная цена в РФ \$267 750	Да	Да
Виртуальный	Виртуальный тренажер краниальных и спинальных операций	Immersive Touch, США	Sensimmer		\$75 000	Да	Да
Виртуальный	Виртуальный тренажер для краниальных и спинальных операций	Враско AMT, США	Dextroscope		\$175 000	Нет	Да
Виртуальный	Виртуальный тренажер краниальных и спинальных операций	Surgical Theater, США	Surgical Rehearsal Platform		\$250 000—\$350 000	Да	Да
Виртуальный	Тренажер спинальной нейростимуляции	SimSuit, США	Neurostimulation Simulator (виртуальная флюороскопия)		Нет данных	Да	Нет

ния черепа, декомпрессии нервных структур, сосудистой микронейрохирургии. Студенты и ординаторы имеют возможность практиковаться на простейших моделях. Более сложные физические и виртуальные технологии способствуют профессиональному развитию даже опытных нейрохирургов, освоению и совершенствованию ими оперативных приемов [38].

Заключение

Таким образом, симуляционные технологии в нейрохирургии позволяют в реальном времени сформировать адекватный уровень навыков практической работы студента, клинического ординатора или врача без риска неблагоприятных последствий здоровью пациента. Во время занятий на симуляционных моделях отрабатываются базовые диагностические и лечебные манипуляции. Симуляционные технологии помогают моделировать контролируемые, безопасные и воспроизводимые близко к реальности клинические ситуации. Кроме того, с их помощью можно максимально адаптировать обучение под конкретные клинические задачи, а также получить высокий уровень профессиональных мануальных навыков.

Конечным результатом использования инновационных симуляционных технологий является разработка механизма формирования индивидуальных образовательных и практических навыков у учащегося не только в нейрохирургии, но и в любой другой врачебной специальности.

Активное внедрение симуляционных технологий в процесс обучения позволит объективно оценить уровень профессиональной подготовки хирургов, повысить уровень их компетенции, а также снизить риск ошибочных действий в сложных клинических ситуациях.

Источники финансирования

Обзорно-аналитическая работа по подготовке статьи проведена в рамках научной программы, поддержанной грантом Российского научного фонда (проект №15-15-30037).

Конфликт интересов

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бывальцев В.А., Белых Е.Г., Коновалов Н.А. Новые симуляционные технологии в медицине // Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. — 2016. — Т. 80. — №2. — С. 102–107. [Byval'tsev VA, Belykh EG, Kononov NA. New simulation technologies in neurosurgery. *Zh Vopr Neurokhir Im N N Burdenko*. 2016;80(2):102–107. (In Russ.)]
2. Бывальцев В.А., Белых Е.Г. Симуляционный тренинг в нейрохирургии. — Новосибирск: Наука; 2016. — 252 с. [Byval'tsev VA, Belykh EG. *Simulyatsionnyi trening v neurokhirurgii*. Novosibirsk: Nauka; 2016. 252 p. (In Russ.)]
3. Бывальцев В.А., Калинин А.А., Панасенков С.Ю., Асанцев А.О. Патент РФ на изобретение №2584136 Способ моделирования дегенеративных изменений позвоночника. Оpubл. Бюллетень №14 от 20.05.16. [Patent RUS №2584136/20.05.02. Byul. №14. Byvaltsev VA, Kalinin AA, Panasenkov SU, Asancev AO. Sposob modelirovaniya degenerativnyh izmenenij pozvonochnika. (In Russ.)] Доступно по: Доступно по <http://www.findpatent.ru/patent/258/2584136.html>. Ссылка активна на 01.06.2016.
4. Choudhury N, Gelinis-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):e9–19. doi: 10.1016/j.wneu.2012.08.022.
5. 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.0000000000000091.
6. Chan S, Conti F, Salisbury K, Blevins NH. Virtual reality simulation in neurosurgery: technologies and evolution. *Neurosurgery*. 2013;72 (Suppl 1):154–164. doi: 10.1227/NEU.0b013e3182750d26.
7. Burchiel KJ. Commentary: Simulation training in neurological surgery. *Neurosurgery*. 2013;73 (Suppl 1):6–7. doi: 10.1227/NEU.0000000000000114.
8. Apuzzo ML. New dimensions of neurosurgery in the realm of high technology: possibilities, practicalities, realities. *Neurosurgery*. 1996;38(4):625–639. doi: 10.1097/00006123-199604000-00001.
9. *Симуляционное обучение в медицине* / Под ред. А.А. Свистунова. — М.: Изд-во Первого МГМУ им. И.М. Сеченова; 2013. — 288 с. [*Simulyatsionnoe obuchenie v meditsine*. Ed by A.A. Svistunov. Moscow: Izd-vo Pervogo MG MU im. I.M. Sechenova; 2013. 288 p. (In Russ.)]
10. Bambakidis NC, Selman WR, Sloan AE. Surgical rehearsal platform: potential uses in microsurgery. *Neurosurgery*. 2013;73 (Suppl 1):122–126. doi: 10.1227/NEU.0000000000000099.
11. Bova FJ, Rajon DA, Friedman WA, et al. Mixed-reality simulation for neurosurgical procedures. *Neurosurgery*. 2013;73 (Suppl 1):138–145. doi: 10.1227/NEU.0000000000000113.
12. Issenberg SB, McGaghie WC, Petrusa ER, et al. Features and uses of high-fidelity medical simulations that lead to effective learning: a BEME systematic review. *Med Teach*. 2005;27(1):10–28. doi: 10.1080/01421590500046924.
13. Harrop JS, Sharan AD, Traynelis VC. *Spine simulation*. Congr Q. 2011;12:12–13.
14. Clarke DB, D'Arcy RC, Delorme S, et al. Virtual reality simulator: Demonstrated use in neurosurgical oncology. *Surg Innov*. 2013;20(2):190–197. doi: 10.1177/1553350612451354.
15. Apuzzo ML, Elder JB, Liu CY. The metamorphosis of neurosurgical surgery and the reinvention of the neurosurgeon. *Neurosurgery*. 2009;64(5):788–794. doi: 10.1227/01.NEU.0000346651.35266.65.
16. Alaraj A, Lemole MG, Finkle JH, et al. Virtual reality training in neurosurgery: Review of current status and future applications. *Surg Neurol Int*. 2011;2:52. doi: 10.4103/2152-7806.80117.
17. Wang VY, Chin CT, Lu DC, et al. Free-hand thoracic pedicle screws placed by neurosurgery residents: a CT analysis. *Eur Spine J*. 2010;19(5):821–827. doi: 10.1007/s00586-010-1293-1.
18. Kalayci M, Cagavi F, Gul S, et al. A training model for lumbar discectomy. *J Clin Neurosci*. 2005;12(6):673–675. doi: 10.1016/j.jocn.2004.12.004.
19. Walker JB, Perkins E, Harkey HL. A novel simulation model for minimally invasive spine surgery. *Neurosurgery*. 2009;65(6 Suppl 1):188–195. doi: 10.1227/01.NEU.0000341534.82210.1B.
20. Alaraj A, Charbel FT, Birk D, et al. 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.
21. Suslu HT, Tatarli N, Karaaslan A, Demirel N. A practical laboratory study simulating the lumbar microdiscectomy: training model

- in fresh cadaveric sheep spine. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg.* 2014;75(3):167–169. doi: 10.1055/s-0032-1330114.
22. Kirkman MA, Ahmed M, Albert AF, et al. The use of simulation in neurosurgical education and training. A systematic review. *J Neurosurg.* 2014;121(2):228–246. doi: 10.3171/2014.5.JNS131766.
 23. Tiede U, Bomans M, Hohne KH, et al. A computerized three-dimensional atlas of the human skull and brain. *AJNR Am J Neuroradiol.* 1993;14(3):551–559.
 24. Malone HR, Syed ON, Downes MS, et al. Simulation in neurosurgery: a review of computer-based simulation environments and their surgical applications. *Neurosurgery.* 2010;67(4):1105–1116. doi: 10.1227/NEU.0b013e3181ee46d0.
 25. Luciano CJ, Banerjee PP, Sorenson JM, et al. Percutaneous spinal fixation simulation with virtual reality and haptics. *Neurosurgery.* 2013;72 (Suppl 1):89–96. doi: 10.1227/NEU.0b013e3182750a8d.
 26. Reznick RK, MacRae H. Teaching surgical skills changes in the wind. *N Engl J Med.* 2006;355(25):2664–2669. doi: 10.1056/NEJMr054785
 27. Quest DO. Naval aviation and neurosurgery: traditions, commonalities, and lessons learned. The 2007 presidential address. *J Neurosurg.* 2007;107(6):1067–1073. doi: 10.3171/JNS-07/12/1067.
 28. Price J, Naik V, Boodhwani M, et al. A randomized evaluation of simulation training on performance of vascular anastomosis on a high-fidelity in vivo model: the role of deliberate practice. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2011;142(3):496–503. doi: 10.1016/j.jtcvs.2011.05.015.
 29. Mattei TA, Frank C, Bailey J, et al. Design of a synthetic simulator for pediatric lumbar spine pathologies. *J Neurosurg Pediatr.* 2013;12(2):192–201. doi: 10.3171/2013.4.PEDS12540.
 30. Marcus H, Vakharia V, Kirkman MA, et al. Practice makes perfect? The role of simulation-based deliberate practice and script-based mental rehearsal in the acquisition and maintenance of operative neurosurgical skills. *Neurosurgery.* 2013;72 (Suppl 1):124–130. doi: 10.1227/NEU.0b013e318270d010.
 31. Rengier F, Mehndiratta A, von Tengg-Kobligk H, et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2010;5(4):335–341. doi: 10.1007/s11548-010-0476-x.
 32. Ray WZ, Ganju A, Harrop JS, Hoh DJ. Developing an anterior cervical discectomy and fusion simulator for neurosurgical resident training. *Neurosurgery.* 2013;73 (Suppl 1):100–106. doi: 10.1227/NEU.0000000000000088.
 33. Rambani R, Ward J, Viant W. Desktop-based computer-assisted orthopedic training system for spinal surgery. *J Surg Educ.* 2014;71(6):805–809. doi: 10.1016/j.jsurg.2014.04.012.
 34. Turan Suslu H, Tatarli N, Hicdonmez T, Borekci A. A laboratory training model using fresh sheep spines for pedicular screw fixation. *Br J Neurosurg.* 2011;26(2):252–254. doi: 10.3109/02688697.2011.619598.
 35. Luciano CJ, Banerjee PP, Bellotte B, et al. Learning retention of thoracic pedicle screw placement using a high-resolution augmented reality simulator with haptic feedback. *Neurosurgery.* 2011;69(1 Suppl Operative):ons14–19; discussion ons19. doi: 10.1227/NEU.0b013e31821954ed.
 36. Vloeberghs M, Glover A, Benford S, et al. Virtual neurosurgery, training for the future. *Br J Neurosurg.* 2007;21(3):262–267. doi: 10.1080/02688690701245824.
 37. Ra JB, Kwon SM, Kim JK, et al. Spine needle biopsy simulator using visual and force feedback. *Comput Aided Surg.* 2002;7(6):353–363. doi: 10.1002/igs.10057.
 38. Manbachi A, Cobbald RS, Ginsberg HJ. Guided pedicle screw insertion: techniques and training. *Spine J.* 2014;14(1):165–179. doi: 10.1016/j.spinee.2013.03.029.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Бывальцев Вадим Анатольевич, доктор медицинских наук, заведующий курсом нейрохирургии Иркутского государственного медицинского университета, главный нейрохирург Департамента здравоохранения ОАО «РЖД», руководитель центра нейрохирургии негосударственного учреждения здравоохранения Дорожной клинической больницы на станции Иркутск-Пассажирский ОАО «РЖД», руководитель научно-клинического отдела нейрохирургии Иркутского научного центра хирургии и травматологии, профессор кафедры травматологии, ортопедии и нейрохирургии Иркутской государственной медицинской академии последипломного образования
Адрес: 664082, Иркутск, ул. Боткина, д. 10, **тел.:** +7 (3952) 63-85-28, **e-mail:** byval75vadim@yandex.ru

Калинин Андрей Андреевич, кандидат медицинских наук, доцент курса нейрохирургии Иркутского медицинского университета, врач-нейрохирург центра нейрохирургии негосударственного учреждения здравоохранения Дорожной клинической больницы на станции Иркутск-Пассажирский ОАО «РЖД»
Адрес: 664082, Иркутск, ул. Боткина, д. 10, **тел.:** +7 (3952) 63-85-28, **e-mail:** andrei_doc_v@mail.ru

Бельх Евгений Георгиевич, ассистент курса нейрохирургии Иркутского медицинского университета, аспирант Иркутского научного центра хирургии и травматологии
Адрес: 664082, Иркутск, ул. Боткина, д. 10, **тел.:** +7 (3952) 63-85-28, **e-mail:** e.belykh@yandex.ru

Степанов Иван Андреевич, аспирант курса нейрохирургии Иркутского государственного медицинского университета
Адрес: 664003, Иркутск, ул. Красного Восстания, д. 14, **тел.:** +7 (951) 632-66-35, **e-mail:** edmoilers@mail.ru