

УДК 616.3-089.844

РЕВОЛЮЦИЯ В ГЕРНИОЛОГИИ: ПРОГНОЗ НА БЛИЖАЙШИЕ 25 ЛЕТ

Б.В. Сигуа

Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

РЕЗЮМЕ. В ближайшие 25 лет медицина, и хирургия в частности, будут претерпевать революционные изменения, обусловленные комбинацией современных биотехнологий, внедрением искусственного интеллекта и появлением новых материалов. С высокой долей вероятности доминантой хирургической науки будет синтез биосовместимых материалов, персонализации лечения с помощью алгоритмов искусственного интеллекта, а также развития полностью автоматизированных роботических систем. Нынешние экспериментальные и доклинические исследования позволяют видеть тенденции, которые проявляются в уже существующих и зарождающихся на наших глазах технологиях, что позволяет с высокой долей вероятности прогнозировать очертания ближайшего будущего. Кроме того, на основе их детального анализа можно представить и описать ожидаемые и желанные технологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: герниология, лечение грыж, биотехнологии, искусственный интеллект, новые хирургические материалы, роботическая хирургия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сигуа Б.В. Революция в герниологии: прогноз на ближайшие 25 лет. *Российский хирургический журнал*. 2025;2(2): 42–47. DOI: 10.18705/3034-7270-2025-1-2-42-47

REVOLUTION IN HERNIOLOGY: FORECAST FOR THE NEXT 25 YEARS

B.V. Sigua

Almazov National Research Medical Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT. In the next 25 years, medicine, and surgery in particular, will undergo revolutionary changes, mainly due to a combination of biotechnology, artificial intelligence and the emergence of new materials. With a high degree of probability, the focus of surgical science will be on biocompatible materials, personalization of treatment using artificial intelligence algorithms, as well as the development of fully automated robotic systems. Based on existing experimental and preclinical studies, it is possible to get an idea of current trends that can be guessed in existing and emerging technologies, which allows us to describe the outlines of the near future with a high degree of probability and, based on a detailed analysis, describe the expected, and possibly desired, technologies.

KEYWORDS: herniology, hernia treatment, biotechnology, artificial intelligence, new surgical materials, robotic surgery

FOR CITATION: Sigua B.V. Revolution in herniology: Forecast for the next 25 years. *Russian Surgical Journal*. 2025;2(2): 42–47. DOI: 10.18705/3034-7270-2025-1-2-42-47 (In Russ.).

В ближайшие 25 лет хирургическое лечение грыж может претерпеть революционные изменения, в основном благодаря комбинации биотехнологий, искусственного интеллекта (ИИ) и качественно новых материалов.

Если не брать во внимание эмпирический период, то свое научное становление герниология обретает в конце XIX в. с работами Эдоардо Бассини (1884–1889) [1] и Вильяма Мейо (1898). Первый разработал метод укрепления задней

стенки пахового канала, ставший основой для большинства последующих пластик, что позволило снизить летальность и уровень рецидивов до 3–10 %, а второй предложил метод удвоения апоневроза при пупочных грыжах. Данные работы определили хирургические подходы, которые доминировали в герниологии практически последующие 100 лет.

Следующий прорывной исторический период пришелся на вторую половину XX в. и всецело

связан с достижениями химической промышленности, а именно появлением синтетических сетчатых материалов из полипропилена (1950-е годы), которые впервые использованы Франсисом Ашером (1958) [2], что положило начало новой эры ненапряжных методов герниопластики. Спустя почти 30 лет метод Лихтенштейна (1986) [3], благодаря минимальным рецидивам (0,5–4,9 %) и возможности выполнения операции под местной анестезией, стал «золотым стандартом» лечения пациентов с паховыми грыжами, а широкое внедрение лапароскопии (1990-е годы) в герниологию сократило восстановительный период и риск осложнений. Данное, безусловно упрощенное, представление об этапах развития герниологии позволяет сконцентрироваться на современных тенденциях, которые угадываются в уже существующих и появляющихся на наших глазах технологиях, что позволяет с высокой долей вероятности описать очертания ближайшего будущего и на основе детального анализа описать ожидаемые и желанные технологии.

Предположительно, в ближайшие 25 лет акцент хирургической науки будет сделан на биосовместимые материалы, персонализацию лечения с помощью алгоритмов ИИ и развитие полностью автоматизированных роботических систем.

Герниологи всего мира давно ждут появления новых материалов и вероятнее всего это будут биodeградируемые импланты с регенеративным потенциалом. Так называемые «умные сетки» в своей основе будут содержать полимеры (например, поликапролактон с гидрогелем или ацетилованный хитозан) с возможностью биodeградации через 6–12 мес, и при этом стимулирующие рост собственной соединительной ткани [4, 5]. Не исключено, что при этом будут использованы встроенные факторы роста, которые ускорят заживление, снижая риск рецидива. Вероятнее всего, для этой цели будут использованы такие факторы стимуляции роста, как VEGF (фактор роста эндотелия сосудов) и TGF- β (трансформирующий фактор роста бета), поскольку именно они активно изучаются в контексте улучшения регенеративных свойств имплантов и ускорения заживления [68]. Комбинированное применение VEGF и TGF- β в «умных сетках» (биоматериалах с регулируемым действием) предполагает так называемое контролируемое высвобождение, а именно гидрогелевые матрицы с пептидами, чувствительными к MMP (матриксным металлопротеиназам). Они обеспечат локальную активацию TGF- β в зоне повреждения, а наночастицы, несущие VEGF и TGF- β , и уже показавшие эффективность в регенерации хряща за счет синергии ангиогенеза и дифференцировки клеток [9, 10], в аспекте интеграции с биоматериалами должны продемон-

стрировать функционализацию коллагеновых имплантов антителами к интегринам (например, α V β 6), направленно активируя TGF- β и минуя системные побочные эффекты. VEGF и TGF- β в «умных сетках» требуют прецизионного контроля доз, временного профиля и изоформ [11, 12]. Современные научные стратегии в данном вопросе фокусируются на следующих аспектах: селективность – таргетирование проангиогенных VEGF165 и антифибротических TGF- β 3; безопасность – блокировка TGF- β в иммунных клетках через ингибиторы интегрин α V β 8 для предотвращения метастазирования; мониторинг – интеграция с биосенсорами для отслеживания концентрации цитокинов *in vivo* [11–13].

Для приближения данных технологий к клинике в ближайшее время предстоит решить существующий научный парадокс – как использовать провоспалительные свойства TGF- β для регенерации, не вызывая фиброза.

Не менее актуальное направление – использование индивидуальных имплантов, созданных с помощью 3D-печати. Уже сегодня возможно создавать сетки с учетом анатомических особенностей пациента, что способствует уменьшению механического напряжения в зоне вмешательства. Одним из таких примеров является проект Biomodex, который, используя данные КТ/MPT пациента, моделирует индивидуальный эндопротез для укрепления тазового дна с помощью биоактивных тканеинженерных конструкций [14, 15]. Существующие проекты нацелены на создание инновационной биосовместимой сетки для лечения грыж. Ключевые особенности данной технологии: умный биоматериал – материал, в состав которого входит гибридный гидрогель на основе коллагена, обогащенный пептидами для стимуляции роста клеток и биоразлагаемыми полимерами (например, полимолочная кислота); адаптивность – сетка меняет жесткость в зависимости от давления в брюшной полости, предотвращая разрывы; персонализированный дизайн – каждая сетка создается на 3D-биопринтере с учетом анатомии пациента.

Данные для печати подобных сеток будут браться из КТ и MPT-сканов, а ИИ-алгоритм поможет спрогнозировать оптимальный размер и структуру ячеек для ускоренной регенерации. Предполагается, что в материал будут встроены наночастицы с противовоспалительными препаратами и факторами роста, которые активируются при контакте с воспалительными маркерами, обеспечивая локальное лечение без системных побочных эффектов [16]. Кроме того, сетка будет постепенно рассасываться (6–12 мес), замещаясь собственной соединительной тканью пациента, а скорость деградации будет регулироваться ферментами организма. Выход данного продукта на рынок возможен уже к 2035 г. Сле-

довало бы отметить, что у данного проекта проглядывается и более долгосрочная перспектива, а именно использование технологии для регенерации иных тканей (мышцы, связки) и создания «умных» имплантов для кардио- и нейрохирургии.

Еще один аспект герниологии, такой как способ фиксации имплантов, вероятно, претерпит существенные изменения в виде полного отказа от фиксирующих устройств в пользу биоклея на основе адгезивных белков [17], аналогичные тем, что используют мидии для прикрепления к скалам, которые позволяют фиксировать сетки без швов. Подобная технология (Mussel BioAdhesive) уже тестируется в США [18].

Можно смело утверждать, что к 2050 г. биоинженерия и смежные технологии радикально изменят медицину. Существующие технологии генной терапии позволяют спрогнозировать появления биологических «заплаток». Так, в частности, технология CRISPR-модификация фибробластов, позволит вводить гены, усиливающие синтез коллагена (например, COL1A1), что потенциально будет укреплять слабые участки брюшной стенки [19–21].

Герниология также станет еще одной точкой приложения для стволовых клеток [22]. Инъекции мезенхимальных стволовых клеток в зону окологрыжевого дефекта будут стимулировать регенерацию без имплантов. Так, в частности, некоторые ученые активно используют мезенхимальные стволовые клетки для восстановления некоторых типов тканей с высокой эффективностью в доклинических и клинических исследованиях [23–25].

Еще одним из перспективных направлений может считаться использование нанороботов для доставки лекарственных препаратов. Подобные клинические испытания могут быть запущены к 2035 г. с использованием нанороботов для доставки антифиброзных препаратов (например, пирфенидон) целенаправленно к месту операции, и тем самым, подавляя воспаление. Также не исключено, что появятся сетчатые эндопротезы со встроенными биодатчиками (рН, давление), которые будут предупреждать пациента о начинающемся рецидиве через мобильное приложение [16].

В ближайшее время эндопротезы и хирургические подходы претерпят существенные изменения, а также с высокой долей вероятности появятся неоперативные методы лечения грыж, мысль о которых сама по себе нарушает один из канонических столпов хирургии. Использование фокусированного ультразвука (HIFU), который неплохо зарекомендовал себя в онкологии [26, 27]. Есть предположение, что у данной методики могут быть большие перспективы и в герниологии, поскольку ультразвуковые волны высокой интенсивности могут бескровно «сваривать»

грыжевые ворота, стимулируя рубцевание тканей, особенно у пациентов с «малыми» грыжами. Следует отметить, что ультразвуковая абляция (HIFU) – это новейший высокотехнологичный метод локального лечения опухолей человека, основанный на воздействии высокоинтенсивных сфокусированных ультразвуковых волн, без повреждения кожных покровов, окружающих тканей и органов [27, 28]. И по всей видимости в ближайшие 10–15 лет она станет активно использоваться в герниологии.

Появление и активное использование ИИ в медицине повлияет и на герниологию. Создаваемые алгоритмы на основе машинного обучения будут анализировать сотни параметров от генетики до образа жизни и формировать прогноз риска рецидива грыжи. Существуют примеры алгоритмов машинного обучения, анализирующих сотни параметров для персонализированных прогнозов. Так, в частности, IBM Watson for Oncology способен анализировать 15 000+ медицинских параметров и публикаций для подбора терапии рака [29], а Framingham Heart Study предсказывает инфаркт с точностью 89 %, объединяя генетику, липиды и стресс-маркеры [30]. Основной целью разработчиков подобных ИИ-продуктов является создание персонализированных протоколов, которые будут способны подобрать оптимальный вид хирургического лечения (открытая, лапароскопическая, роботическая), а также тип эндопротеза для каждого пациента.

Вместе с тем и роботическая хирургия с появлением ИИ претерпит революционные изменения. К 2050 г., а возможно и раньше, появятся полностью автономные роботизированные системы, а всемирно известный робот Da Vinci к 2030 г. обзаведется ИИ-навигацией с анализом рисков в реальном времени. Проводятся исследования в области автономной хирургии, которые в основном сосредоточены на автоматизации задач в контролируемых условиях. Так, ученые из университета Джонса Хопкинса (США) описывают робота SRT-H (Surgical Robot Transformer-Hierarchy), который выполнил холецистэктомию на свиной модели (ex vivo). При этом робот работал автономно, без прямого вмешательства человека, используя иерархическую систему ИИ, обученную на видеозаписях операций, выполненных хирургами [31]. Кроме того, активно развиваются технологии дополненной реальности (AR). Во время операции хирург может видеть 3D-проекцию грыжевых ворот и сосудов через AR-очки или используя проекцию 3D-анатомии. Данные технологии позволяют увеличить точность манипуляции >99 %, а время операции может быть сокращено на 30 % [32].

Вероятнее всего к 2050 г. произойдет полная интеграция ИИ и автономных систем. Это при-

ведет к появлению автономных оперативных вмешательств. Искусственный интеллект будет анализировать данные в реальном времени, предсказывать осложнения и выполнять рутинные этапы операций без прямого контроля хирурга. Разработанные алгоритмы смогут самостоятельно формировать швы или осуществлять резекционные этапы оперативного вмешательства, основываясь на предоперационном сканировании и данных истории болезни.

Возможности предиктивной аналитики будут существенно расширены, за счет проявляющихся больших объемов данных (Big Data) и использования глобальных баз данных операций для выбора оптимальной стратегии.

Кроме того, произойдет расширение функциональности за счет нанотехнологий и биопечати. В инструменты Da Vinci интегрируют нанокapsулы для адресной доставки лекарств или маркировки опухолей, что повысит эффективность онкохирургии и сократит риск рецидивов. Самые смелые предсказания предвещают появление биопечати в реальном времени, когда робот сможет печатать ткани во время операции.

Вероятнее всего будет доработана сенсорика роботических инструментов и улучшена обратная тактильная связь, что позволит передавать не только сопротивление тканей, но и их текстуру, температуру и плотность. Это позволит хирургу «чувствовать» операционное поле через интерфейс, как при открытой операции. Не исключено, что управление роботом может осуществляться через нейроимпланты или голосовые команды, что ускорит реакцию и снизит усталость хирурга. Что касается роботического инструментария, то инженерная наука в данном вопросе, вероятнее всего, пойдет по пути миниатюризации.

Говоря о возможном сценарии хирургического лечения 45-летнего пациента с рецидивной паховой грыжей, в 2050 г. с помощью робота Da Vinci, вероятно, в рамках предоперационного обследования будет выполнено 3D-сканирование. Бесконтактный сканер создаст цифровой двойник грыжевого мешка и окружающих тканей. Искусственный интеллект проанализирует данные, прогнозируя нагрузку на сетку и оптимальный размер ячеек. Биопринтер Da Vinci напечатает персонализированную сетку с учетом анатомии пациента. В материал будут встроены нанокapsулы с противовоспалительным препаратом и факторами роста коллагена. Оперативный доступ будет осуществлен роботом — два разреза по 3 мм, через них будут вводиться микроманипуляторы (диаметр 1,5 мм) и камера с разрешением 8К. Оперативное вмешательство будет осуществляться автономно: ИИ-ассистент Da Vinci распознает рубцовую ткань после предыдущего вмешательства и автоматически корректирует траекторию инструментов, избегая

повреждения сосудов. Робот разместит «умную» сетку, используя тактильную обратную связь. Хирург, контролирующий процесс, «почувствует» сопротивление тканей через нейроинтерфейс. Нанороботы активируются, маркируя зоны воспаления и доставляя лекарства точно в проблемные участки. При обнаружении слабых участков апоневроза Da Vinci напечатает дополнительный слой биогеля, укрепляя брюшную стенку. Оперативное вмешательство будет завершено наложением умной повязки с беспроводными сенсорами, которые будут мониторить температуру, давление и pH, передавая данные в приложение пациента.

Это один из возможных или невозможных технологичных сценариев развития хирургической науки. Внедрение и использование появляющихся технологий, в том числе на основе ИИ, позволит полностью автоматизировать ИИ, что приведет к формированию алгоритмов, предупреждающих о риске рецидива, сравнивая данные с 5 000 000+ аналогичных операций в глобальной базе данных. Разрабатываемая экосистема («умная» сетка + Da Vinci) приведет к синхронизации сетки с роботом, что позволит корректировать ее жесткость в режиме реального времени. Все перечисленное приведет к существенному сокращению длительности оперативного вмешательства, восстановительного послеоперационного периода и снижению риска рецидива (менее 1 %).

Ключевыми драйверами развития медицины на ближайшие десятилетия станут ИИ, биоматериалы и геномная инженерия, а ключевые аспекты развития хирургии будут в первую очередь связаны с симбиозом ИИ и хирурга, поскольку 80 % рутинных действий будет выполнять робот, но при этом человеческий контроль над критическими решениями сохранится.

Возвращаясь к прогнозу на 2050 г., можно смело утверждать, что лечение грыж станет малотравматичным, персонализированным и косметически щадящим, с вероятностью развития рецидива менее 1 %. Внедрение автономных роботических систем в длительной перспективе приведет к снижению стоимости оперативного лечения. Однако ключевым останется вопрос баланса между инновациями и безопасностью. Все перечисленное несет этические вызовы для специалистов, поскольку данные технологии, особенно вначале, будут доступны лишь в развитых странах, что только углубит существующее медицинское неравенство. Кроме того, роботы, ведущиеся по генной модификации тканей, требуют многолетних наблюдений для верификации и исключения побочных рисков.

В завершении хотелось бы подчеркнуть, что технологии не обладают собственным вдохновением и волей. Они усиливают человеческие действия — как созидательные, так и разрушитель-

ные. Как отмечал один из ведущих программистов мира Линус Торвальдс, их роль ограничена «дешевизной и возможностями», а смысл, этика и применение всегда остаются в руках человека.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests. The author declare no conflict of interests.

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Соответствие нормам этики. Исследование одобрено локальным этическим комитетом. Пациентами подписано информированное согласие на публикацию данных, полученных в результате исследований.

Compliance with ethical principles. The study was approved by the Local Ethics Committee. All patients signed informed consent for publication of data from the studies.

Список литературы / References

1. Bassini E. Nuovo metodo operativo per la cura dell'ernia inguinale. Padua: Prosperini, 1889.
2. Usher F.C. A new plastic prosthesis for repairing tissue defects of the chest and abdominal wall. *Am J Surg.* 1959;97(5):629–33. DOI: 10.1016/0002-9610(59)90256-9.
3. Irving L. Lichtenstein, Alex G. Shulman Ambulatory outpatient hernia surgery. Including a new concept, introducing tension-free repair. *International Surgery (Int Surg).* 1986;71(1):1–4.
4. Qiao J., Jiang Z., Yang Y., et al. Study of a new biodegradable hernia patch to repair abdominal wall defect in rats. *Carbohydr Polym.* 2017;15(172):255–264. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.05.035.
5. Chen J., Hong G., Guo N., Liu T. Hernia repair patch: recent advances in material design and application. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research.* 2025;29(16):3494–3502.
6. Liu Z., Liu X., Bao L., et al. The evaluation of functional small intestinal submucosa for abdominal wall defect repair in a rat model: Potent effect of sequential release of VEGF and TGF- β 1 on host integration. *Biomaterials.* 2021;276:120999. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2021.120999.
7. Zhang N., Huang Y., Wei P., et al. Killing two birds with one stone: A therapeutic copper-loaded bio-patch promoted abdominal wall repair via VEGF pathway. *Mater Today Bio.* 2023;22:100785. DOI: 10.1016/j.mtbio.2023.100785.
8. Melissa T.B., Pallavi C., Lizhong D., Willy H. The roles of TGF- β and VEGF pathways in the suppression of antitumor immunity in melanoma and other solid tumors. *Pharmacol Ther.* 2022;240:108211. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2022.108211.
9. Ziqin D., Tao F., Chu X., et al. TGF- β signaling in health, disease and therapeutics. *Signal Transduct Target Ther.* 2024;9:61. DOI: 10.1038/s41392-024-01764-w.
10. Paola A. Guerrero and Joseph H. McCarty TGF- β Activation and Signaling in Angiogenesis. *Physiologic and Pathologic Angiogenesis – Signaling Mechanisms and Targeted Therapy.* 2017. DOI: 10.5772/66405.
11. Savari R., Shafiei M., Galehdari H., Kesmati M. Expression of VEGF and TGF- β Genes in Skin Wound Healing Process Induced Using Phenytoin in Male Rats. *Jundishapur Journal of Health Sciences.* DOI: 10.5812/jjhs.86041.
12. Ferrari G., Cook B.D., Terushkin V., et al. Transforming growth factor-beta 1 (TGF- β 1) induces angiogenesis through vascular endothelial growth factor (VEGF)-mediated apoptosis. *J Cell Physiol.* 2009;219(2):449–458. DOI: 10.1002/jcp.21706.
13. Bonfiglio V., Platania C.B.M., Lazzara F., Conti F. TGF- β Serum Levels in Diabetic Retinopathy Patients and the Role of Anti-VEGF Therapy. *Int. J. Mol. Sci.* 2020;21(24):9558. DOI: 10.3390/ijms21249558.
14. Kallyanashis P., Saeedeh D., O'Connell C.D., et al. 3D Printed Mesh Geometry Modulates Immune Response and Interface Biology in Mouse and Sheep Model: Implications for Pelvic Floor Surgery. *Adv Sci (Weinh).* 2025;12(11):e2405004. DOI: 10.1002/advs.202405004.
15. Омелько Н.А., Халимов Р.И. Композитные матрицы для применения в травматологии и регенеративной медицине. *Научное обозрение. Медицинские науки.* 2022;6:89–94. DOI: 10.17513/srms.1309. [Omelko N.A., Khalimov R.I. Composite matrices for use in traumatology and regenerative medicine. *Scientific review. Medical sciences.* 2022;6:89–94. DOI: 10.17513/srms.1309. (In Russ.)].
16. Saiding Q., Chen Y., Wang J., et al. Abdominal wall hernia repair: from prosthetic meshes to smart materials. *Mater Today Bio.* 2023;21:100691. DOI: 10.1016/j.mtbio.2023.100691.
17. Clarke T. Fibrin glue for intraperitoneal laparoscopic mesh fixation: comparative study in swine model. *Surg. Endosc.* 2011;25:737–748.
18. Pandey N., Soto-Garcia L.F., J. Liao, et al. Mussel-Inspired Bioadhesives in Healthcare: Design Parameters, Current Trends, and Future Perspectives. *Biomater Sci.* 2020;8(5):1240–1255. DOI: 10.1039/c9bm01848d.
19. Xiang G.-M., Zhang X.-L., Xu C.-J., et al. The collagen type I alpha 1 chain gene is an alternative safe harbor locus in the porcine genome. *Journal of Integrative Agriculture.* 2023;22(1):202–213. DOI: 10.1016/j.jia.2022.08.105.

20. Cao Y., Li L., Ren X., et al. CRISPR/Cas9 correction of a dominant cis-double-variant in COL1A1 isolated from a patient with osteogenesis imperfecta increases the osteogenic capacity of induced pluripotent stem cells. *J Bone Miner Res.* 2023;38(5):719–732. DOI: 10.1002/jbmr.4783.
21. Huang Y., Dong J., Feng L., Li P. Effects of endogenous nestin overexpression on proliferation, migration and MAPK signal transduction pathway in NIH3T3 cells. *Journal of Third Military Medical University.* 2020;42(2):125–132.
22. Камалов А.А., Охоботов Д.А. Стволовые клетки и их использование в современной клинической практике. *Урология.* 2012;(5):105–114. [Kamalov A.A., Okhobotov D.A. Stem cells and their use in modern clinical practice. *Urology.* 2012;(5):105–114. (In Russ.)].
23. Ma Q., Liao J., Cai X. Different Sources of Stem Cells and their Application in Cartilage Tissue Engineering. *Curr Stem Cell Res Ther.* 2018;13(7):568–575. DOI: 10.2174/1574888X13666180122151909.
24. Wang Z., Ren L., Li Z., et al. Impact of Different Cell Types on the Osteogenic Differentiation Process of Mesenchymal Stem Cells. *Stem Cells Int.* 2025;5551222. DOI: 10.1155/sci/5551222.
25. Yamaguchi N., Horio E., Sonoda J., et al. Immortalization of Mesenchymal Stem Cells for Application in Regenerative Medicine and Their Potential Risks of Tumorigenesis. *Int J Mol Sci.* 2024;25(24):13562. DOI: 10.3390/ijms252413562.
26. Zulkifli D., Manan H. A., Yahya N., Hamid H. A. The Applications of High-Intensity Focused Ultrasound (HIFU) Ablative Therapy in the Treatment of Primary Breast Cancer: A Systematic Review. *Diagnostics.* 2023;13(15):2595. DOI: 10.3390/diagnostics13152595.
27. Bachu V.S., Kedda J., Suk I., et al. High-Intensity Focused Ultrasound: A Review of Mechanisms and Clinical Applications. *Ann Biomed Eng.* 2021;49(9):1975–1991. DOI: 10.1007/s10439-021-02833-9.
28. Kun G., Wan M. Effects of fascia lata on HIFU lesioning in vitro. *Ultrasound Med Biol.* 2004;30(7):991–8. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2004.05.004.
29. Zhou N., Zhang C.-T., Lv H.-Y., et al. Concordance Study Between IBM Watson for Oncology and Clinical Practice for Patients with Cancer in China. *Oncologist.* 2018;24(6):812–819. DOI: 10.1634/theoncologist.2018-0255.
30. Yuda E., Kaneko I., Hirahara D. Machine-Learning Insights from the Framingham Heart Study: Enhancing Cardiovascular Risk Prediction and Monitoring. *Appl. Sci.* 2025;15(15):8671. DOI: 10.3390/app15158671.
31. Woong J., Kim B., Chen J.-T., et al. SRT-H: A hierarchical framework for autonomous surgery via language-conditioned imitation learning. *Sci Robot.* 2025;10(104):eadt5254. DOI: 10.1126/scirobotics.adt5254.
32. Chegini S., Edwards E., McGurk M., et al. Systematic review of techniques used to validate the registration of augmented-reality images using a head-mounted device to navigate surgery. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2023;61(1):19–27. DOI: 10.1016/j.bjoms.2022.08.007.

Поступила 03.08.2025

Принята 08.08.2025

Опубликована 29.08.2025

Received 03.08.2025

Accepted 08.08.2025

Publication 29.08.2025

Автор

Сигуа Бадри Валериевич – д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой общей хирургии Института медицинского образования, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Министерства здравоохранения России, Санкт-Петербург, Россия, sigua_bv@almazovcentre.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4556-4913>

Author

Sigua Badri V. – Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of General Surgery, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of Russian Federation, St. Petersburg, Russia, sigua_bv@almazovcentre.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4556-4913>