

Систематический обзор технологий и методов телеультразвуковых исследований

© К.М. АРЗАМАСОВ, В.А. ДРОГОВОЗ

ГБУЗ города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения Москвы», Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Цель исследования. Выполнить систематический обзор данных о технологиях и методах телеультразвуковых исследований (телеУЗИ).

Материал и методы. Источники данных: PubMed (в т.ч. MEDLINE), Embase, Google Scholar, CYBERLENINKA, eLIBRARY. В результате поиска обнаружены 1032 статьи, которые подвергнуты текстовому анализу с применением Rayyan QCRI. В результате в обзор включены 57 статей о телеУЗИ, разделенных на две группы: техническое обеспечение телеУЗИ (35 статей) и роботизированные ультразвуковые (УЗ) установки (22 статьи). По этим модальностям суммированы основные положения.

Результаты. Реализация телеУЗИ возможна двумя способами: в режиме реального времени и по типу «сохраняй и передавай». Для передачи данных УЗИ использованы разные технологии — электронная почта, пересылка УЗ-данных на твердых носителях посредством курьерских служб, ISDN, дуплексные и спутниковые каналы связи. Большое значение в последнее время приобрели способы передачи данных УЗИ посредством Интернета и мобильных телефонов. Применяются различные программные решения для реализации телеУЗИ: NetMeeting, iChat и Skype. Отдельно выделена группа роботизированного УЗИ. Описаны различные реализации телеУЗИ при помощи роботизированных установок, а также системы позиционирования УЗ-датчика.

Выводы. Дальнейшее развитие метода телеультразвуковых исследований видится в симбиозе с технологией искусственного интеллекта, которая сделает возможным проведение автоматизированного анализа ультразвуковой картины. Снижая оператор-зависимость метода ультразвуковых исследований, в ближайшем будущем телеультразвуковые исследования позволят существенно повысить точность диагностики.

Ключевые слова: телесонография, телеУЗИ, ультразвуковая диагностика, телемедицина.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Арзамасов К.М. — <https://orcid.org/0000-0001-7786-0349>; e-mail: k.arzamasov@npcmr.ru

Дрогоров В.А. — <https://orcid.org/0000-0001-9582-7147>

Автор, ответственный за переписку: Арзамасов К.М. — e-mail: k.arzamasov@npcmr.ru

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Арзамасов К.М., Дрогоров В.А. Систематический обзор технологий и методов телеультразвуковых исследований. *Медицинские технологии. Оценка и выбор.* 2020;41(3):42–52. <https://doi.org/10.17116/medtech20204103142>

Systematic review of technologies and methods of tele-ultrasound

© К.М. ARZAMASOV, V.A. DROGOVOZ

Research and Practical Clinical Center for Diagnosis and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

ABSTRACT

Objective. To systematize data on the technologies and methods of tele-ultrasound.

Material and methods. Data were collected using PubMed (including MEDLINE), Embase, Google Scholar, CYBERLENINKA, eLIBRARY databases. There were 1,032 articles which were subjected to text analysis using Rayyan QCRI software package. Thus, the review included 57 articles devoted to tele-ultrasound. The manuscripts were divided into 2 groups: technical support for tele-ultrasound (35 articles) and robotic ultrasound systems (22 articles). The main points were summarized for these modalities.

Results. Implementation of tele-ultrasound is possible in two fashions: on-line and in «save and transmit» mode. Various technologies were used for ultrasound data transmission — e-mail, sending ultrasound data on solid carriers through courier services, ISDN, duplex and satellite communication channels. Recently, ultrasound data transmission via the Internet and mobile phones has gained a great importance. Various software solutions including NetMeeting, iChat and Skype are used for tele-ultrasound. We separate an additional group of robotic ultrasound. Various schemes of tele-ultrasound based on robotic devices and ultrasound sensor positioning system were described.

Conclusion. Further development of tele-ultrasound is seen in symbiosis with artificial intelligence technology, that will make it possible to conduct automated analysis of ultrasound data. In the near future, tele-ultrasound will significantly improve an accuracy of diagnosis by reducing the operator dependence of ultrasound examination.

Keywords: tele-sonography, tele-ultrasound, ultrasonography, telemedicine.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:Arzamasov K.M. — <https://orcid.org/0000-0001-7786-0349>; e-mail: k.arzamasov@npcmr.ruDrogovoz V.A. — <https://orcid.org/0000-0001-9582-7147>**Corresponding author:** Arzamasov K.M. — e-mail: k.arzamasov@npcmr.ru**TO CITE THIS ARTICLE:**Arzamasov KM, Drogovoz VA. Systematic review of technologies and methods of tele-ultrasound. *Medical Technologies. Assessment and Choice*. 2020;41(3):42–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/medtech20204103142>

Телеультразвуковое исследование (телеУЗИ) — метод оказания медицинской помощи с применением телемедицинских технологий, для реализации которого необходимы ультразвуковой аппарат, расположенный рядом с пациентом, и дистанционно расположенный врач-специалист ультразвуковой диагностики (УЗД). Врач-специалист получает и обрабатывает информацию с ультразвукового прибора и высылает пациенту заключение или рекомендации. Данный метод нашел широкое применение во всем мире, но в России практически не используется. Развитие телеУЗИ в мире стало возможным благодаря двум основным факторам: появлению мобильных УЗ-сканеров и доступности технологий передачи данных [1]. По этим пунктам есть все предпосылки для реализации телеУЗИ в отечественной медицине. Таким образом, для выбора пути реализации телеУЗИ необходимо обобщение мирового опыта в решении этой проблемы.

Цель исследования — выполнить систематический обзор данных о технологиях и методах телеУЗИ.

Материал и методы

Мы выполнили обзор всех публикаций по телеУЗИ в соответствии со стандартом PRISMA (the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [2]. Включены только исследования, опубликованные до 5 января 2020 г. Критерии включения: 1) проведенное пациенту УЗИ; 2) передача ультразвуковых (УЗ) изображений удаленному специалисту для интерпретации и получение обратной связи; 3) данные о техническом решении для телеУЗИ. Критерии исключения: 1) исследования, не относящиеся к человеку; 2) исследования с использованием исключительно 1D-ультразвука — режима А (Amplitude) и режима М (Motion); 3) обзорные статьи, рефераты.

Стратегия поиска

Поиск литературы проведен в библиографических базах данных PubMed, Embase, а также в поисковых базах данных научных публикаций Google Scholar, CYBERLENINKA, eLIBRARY (Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)). Поиск по всем базам данных проведен на английском и русском языках (Google Scholar, eLIBRARY (Рос-

сийском индексе научного цитирования (РИНЦ)). Ключевые термины для поиска: «telesonography», «tele-ultrasound», «telemedicine», «ultrasonography», «телеультразвук», «ультразвук», «телемедицина», присутствующие в названии или аннотации, а также их синонимы («дистанционная ультразвуковая диагностика», «телесонаграфия», «дистанционное ультразвуковое обследование», «сонаграфия», «электронное здравоохранение»).

Для англоязычной литературы использовали термины MESH для PubMed и MEDLINE («eHealth», «ultrasound», «tele-radiology», «tele-diagnostic», «Hand-Carried Ultrasound», «robotic ultrasound»). Поиск в базе данных завершен 5 января 2020 г., отобраны все работы, опубликованные до этой даты, с обозначенными ключевыми словами. Далее авторы провели оценку на соответствие критериям включения в настоящий обзор и проанализировали ссылки в найденных документах на предмет включения дополнительных источников.

База данных источников сформирована в приложении Mendeley Desktop (Elsevier). По завершении этапа поиска сведения обо всех литературных источниках экспортированы в Rayyan QCRI [3]. Эта платформа использована для текстового анализа рефератов всех литературных источников на английском языке. Источники на русском языке обработаны без использования специализированных программных средств. Полнотекстовые источники, отобранные в ходе анализа рефератов, легли в основу текущего обзора.

Получение и анализ данных

Данные, полученные из каждого исследования, включают: тип и вид УЗИ, место исследования, год публикации, метод дистанционного УЗИ, размер выборки, оцениваемую систему органов, средства связи и оборудование для обработки результатов дистанционного УЗИ.

Обобщение результатов

В настоящем систематическом обзоре сводная статистика не использовалась. Качество исследований и неоднородность материала препятствовали выполнению их статистической обработки. Объединение данных также оказалось невозможным, метаанализ не проводился из-за качества данных.

Результаты

В результате поиска литературы в библиографических базах данных PubMed, Embase, Google Scholar, CYBERLENINKA, eLIBRARY найдены 1032 статьи, 64 дубликата удалены. После анализа названий и рефератов 752 статьи удалены из-за несоответствия критериям включения. Из оставшихся 216 статей выявлены 149 полнотекстовых версий, из которых 92 удалены по причине несоответствия критериям включения. Таким образом, в итоговый анализ включены 57 статей на английском языке, разделенных на 2 группы: техническое обеспечение телеУЗИ (35 статей) и роботизированные УЗ-установки (22 статьи). Статей на русском языке, удовлетворяющих критериям включения, не обнаружено. Схема процесса поиска и отбора исследований показана на **рис. 1**.

Техническое обеспечение телеУЗИ

Одна из первых работ по передаче УЗ-изображений для практического клинического применения датирована 1997 г. [4]. В этой работе показана возможность передачи изображения из кабинета УЗИ в конференц-зал посредством глобальной компьютерной сети (WAN) с помощью асинхронного метода передачи (ATM — asynchronous transfer mode) на расстояние до 30 км. В данном исследовании также указана возможность интеграции с PACS (Picture Archiving and Communication System — система передачи и архивации DICOM-изображений, DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) — международный стандарт создания, хранения, визуализации и передачи медицинских файлов, которые хранят информацию о проведенных исследованиях). В этом же году вышла статья, посвященная созданию мини-PACS для ультразвука [5]. Мини-PACS позволяла получить одновременный доступ врачей к УЗ-изображениям и заключениям. DICOM дает возможность объединить множество различных диагностических устройств, обеспечить полную совместимость и возможность оценки, в том числе УЗ-данных с устройств разных производителей. Это важный шаг к созданию единых диагностических баз данных. В начальном периоде становления телеУЗИ использование такого стандарта представляло значительную проблему из-за большого размера файлов УЗ-данных, что существенно осложняло их передачу по низкоскоростным каналам связи.

В настоящее время существуют два режима работы по технологии телеУЗИ: в режиме реального времени и по типу «сохрани и передавай». При использовании технологии сохранения/передачи данных исследование проводится дистанционно, полностью автономно, все УЗ-изображения и кинопетли сохраняются на сканере, а потом передаются для анализа. В режиме реального времени происходит потоковая передача видеоизображения. Обе технологии имеют одинаковую клиническую эффективность при низкой пропускной способности канала [6].

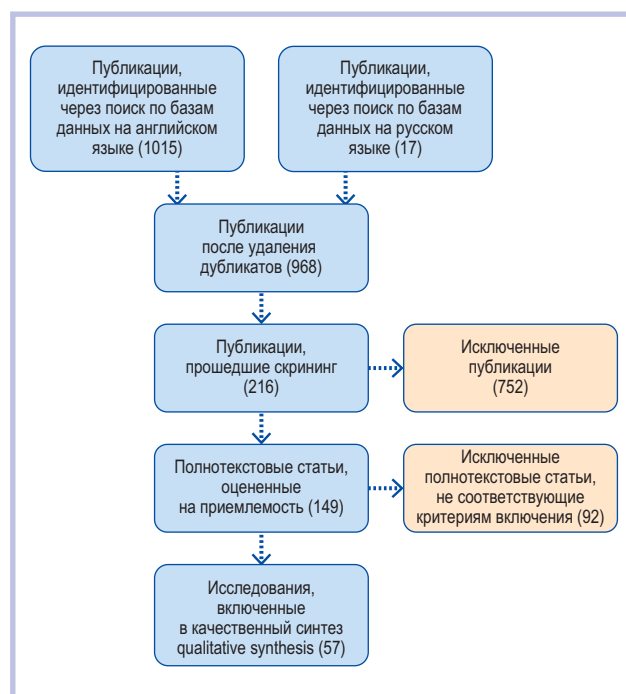


Рис. 1. Результаты поиска: диаграмма PRISMA (the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses).

Fig. 1. Searching results: PRISMA (the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) diagram.

Известно, что технология передачи данных в режиме реального времени более требовательна к пропускной способности канала связи. Показано, что применение технологии «сохрани и передавай» позволяет отправлять статические изображения и видео удаленным экспертам еще до того момента, пока пациент покинет кабинет [7]. Установлено, что общее время исследования при такой технологии увеличивается из-за задержки в его описании экспертом [8]. Помимо изложенных выше технологий существует промежуточный вариант. При большом расстоянии между экспертом и пациентом, например при связи между материками или посредством спутниковой связи, неминуемо возникает временная задержка от долей секунды до нескольких секунд или минут, как показано при моделировании диагностического УЗИ и лапароскопической аппендэктомии астронавту на Марсе [9].

В 2001 г. А. Mehta и соавт. проводили исследование по оценке качества работы телеУЗИ и сделали выбор в пользу ISDN-канала связи (Integrated Services Digital Network — передача цифрового сигнала по телефонным каналам с предоставлением различных служб), сравнивая его со скоростью работы курьерских служб по пересылке УЗ-данных на твердых носителях [10]. Проводились исследования телеУЗИ с передачей данных УЗИ по электронной почте [11, 12]. Этот способ показал свою эффективность для статических изображений.

В начале 2000-х годов высокоскоростные каналы связи были редкостью, а также сохранялись серьезные ограничения пропускной способности спутниковых каналов связи [13]. По этой причине ряд исследователей изучили альтернативные алгоритмы сжатия и кодирования УЗ-изображений и видео для получения оптимального качества УЗИ [9, 14–22]. Так, хорошие результаты показал алгоритм сжатия видео H.263 [20], позволивший передавать видеоизображение в реальном времени по ISDN-каналу связи с пропускной способностью 128 Кбит/с.

Многие авторы отмечают эффективную работу пришедшего на смену ему нового алгоритма сжатия MPEG-4 (международный стандарт, используемый преимущественно для сжатия цифрового аудио и видео, включающий группу стандартов сжатия аудио и видео и смежные технологии, одобренные ISO — Международной организацией по стандартизации — IEC Moving Picture Experts Group; в данном случае речь о стандарте сжатия H.264) и фиксируют оптимальное разрешение видеоизображения при низкой пропускной способности 640×480 пикселей [19, 22].

Во многих работах указывается минимально допустимая скорость подключения 256 Кбит/с, которая обеспечивает передачу видео со скоростью 2 кадра/с. Ряд авторов считают допустимой минимальную частоту смены кадров для комфортной работы удаленно расположенного эксперта 15 кадров/с при условии сохранения оригинального разрешения видео, что достигается на скорости подключения 0,6 Мбит/с [19] — 1,5 Мбит/с [17]. Из-за невозможности постоянно поддерживать одинаковую скорость канала связи для повышения качества видеоизображений использовали динамически изменяющийся битрейт видеосигнал, оптимизируя его с учетом текущей пропускной способности [23]. Наличие локального широкополосного интернет-подключения (10–50 Мбит/с) позволяло комфортно проводить роботизированное УЗИ [24].

Многие исследователи считают, что для удаленно расположенных медицинских центров оптимальной является передача данных в формате DICOM. Но из-за ограничений в пропускной способности каналов связи рекомендуется проводить по протоколу дистанционное исследование, сохранять его в формате DICOM и лишь затем передавать для удаленной консультации [14, 25]. Все авторы приходят к единому мнению, что с точки зрения качества УЗ-картины оптимальна прямая передача DICOM, но она требует высокой пропускной способности канала связи — более 5 Мбит/с [15]. При использовании передачи в режиме реального времени требуется применение параллельных каналов связи (для передачи УЗ-изображения, данных с камеры, расположенной у пациента с целью визуальной оценки положения УЗ-датчика, и для организации телемедицинской консультации «врач — пациент»), а также аудиоканала связи. Для этих целей используются дуплексные каналы связи [26, 27].

С развитием сети Интернет многие исследователи стали изучать возможности ее использования для целей телеУЗИ. Так, в работе A.S. Liteplo и соавт. (2011 г.) сравнивалась эффективность применения сервисов iChat и Skype для проведения телеУЗИ посредством беспроводных сетей 3G и Wi-Fi [16]. Skype из-за собственного алгоритма сжатия видео существенно ухудшал качество передаваемого изображения, несмотря на более высокое разрешение. В 2013 г. Р. McBeth и соавт. показали эффективность использования Skype для оценки тяжелой, жизнеугрожающей патологии. Позднее S. Jensen и соавт. (2019 г.) продемонстрировали возможность эффективного применения Skype для телеУЗИ при выполнении других УЗИ на экспертном сканере и при хорошем интернет-соединении [28]. Для обеспечения телеУЗИ стали использовать различные файлообменники, например Dropbox. [29]. При использовании сети Интернет становится актуальным вопрос не только сжатия данных, но и их шифрования для обеспечения конфиденциальности [18, 23].

Первые работы, посвященные использованию смартфонов для проведения телеУЗИ, появились в 2005 г. и заключались в фотографировании УЗ-снимков на камеру мобильного телефона и отправке на мобильный телефон врачу-эксперту для оценки [30]. Данный способ имел существенные ограничения: разрешение фотографии составляло 640×480 пикселей, а ее качество было намного хуже оригинала. Тем не менее удаленный эксперт меньше чем через 2 мин получал снимок без использования специализированной аппаратуры. Позднее изучали возможности технологии MMS (The multimedia messaging service) для передачи видеозаписи исследования [31]. При таком способе передачи разрешение было очень низким (176×144 пикселей), частота кадров — 15 кадров/с, но этого хватало для диагностики, например, выраженного перикардального выпота. С развитием мобильной техники и увеличением пропускной способности интернет-подключений мобильных сетей расширились возможности применения и качество телеУЗИ посредством смартфона [32]. Разрешение встроенных камер выросло, качество фото- и видеозаписей существенно улучшилось. Изменения коснулись и качества дисплеев смартфонов: картинка на них незначительно уступала оригинальному изображению [33].

Интересный алгоритм работы с УЗ-данными предложили А. Meig и В. Rubinsky (2009 г.). Данные с мобильного УЗ-сканера передавали на удаленный сервер, который их обрабатывал, формировал трехмерное (three-dimensional, 3D) изображение и высылал на мобильный телефон результат обработки с задержкой 30 с [34]. Таким образом повышалось качество изображения, получаемого с портативного УЗ-сканера. В последующем это 3D-изображение можно было передать дистанционно расположенному специалисту

для оценки. Для проведения анализа или дальнейшего использования 3D-УЗ-изображения требуется привязка к пациенту в единой системе координат, практическое решение этой задачи предложено Р. Tuomola и соавт. [35]. Позже разработана система позиционирования датчика при помощи камеры и меток на датчике и теле пациента [36].

С развитием технологии обработки изображения появилась возможность принципиально нового подхода в дистанционной оценке корректности установки УЗ-датчика посредством 3D-камеры [37]. Эти камеры способны передать дистанционно расположенному специалисту нахождение УЗ-датчика и пациента в единой системе координат. Появились технологии обработки телеУЗИ, например технология Watermark, позволяющая определять степень стеноза сонных артерий за счет автоматической разметки границы просвета сосуда [38].

Развитие телеУЗИ стало возможно благодаря двум основным факторам: появлению мобильных УЗ-сканеров и доступности скоростных технологий передачи данных. Первым направлением практической реализации телеУЗИ были дистанционные оператор-управляемые телеУЗИ, позже появилось второе направление — роботизированные УЗ-установки.

Роботизированные УЗ-установки

Роботизированные УЗ-установки заменяют ассистента, управляющего УЗ-датчиком. Дистанционно расположенный специалист, манипулируя имитатором УЗ-датчика, управляет роботизированной рукой с УЗ-датчиком, проводя исследование пациента. Использование роботизированной УЗ-установки намного эффективнее аудиовидеоконтролируемого управления датчиком ассистентом [39]. В нескольких исследованиях при сопоставлении с традиционным УЗИ показано, что время, затраченное на исследование роботизированной установкой, больше [39], а качество исследования незначительно снижено [39–42]. Противоположный результат получили М. Georgescu и соавт. (2016 г.): показано, что качество роботизированного УЗИ не уступает классической УЗ-диагностике [43].

Объединение статей с целью их совместной оценки невозможно: авторы по-разному оценивают качество проводимого исследования. Большинство авторов сравнивают исследования, выполненные роботизированной УЗ-установкой, с исследованием, проведенным по общепринятой методике, но на разных аппаратах. В основном в роботизированной установке используется мобильная УЗ-аппаратура, имеющая класс, отличный от высочайшего (high-end), который служит контролем [44].

Следует отметить, что исследования проводят разные специалисты, обладающие разным опытом. Напротив, техническая сторона вопроса в статьях изложена более основательно: главный аспект — адаптация метода к имеющейся пропускной способности

канала связи. Так, минимально возможная скорость соединения 2×64 Кбит/с через спутниковую систему связи не позволяет достоверно оценить получаемое УЗ-изображение, поэтому необходимо использовать минимум 256 Кбит/с и 15 кадров/с [40]. Роботизированные УЗ-установки способны работать с широким диапазоном скоростей подключения: низкоскоростные спутниковые каналы связи, мобильные беспроводные сети, широкополосные и т.д. [45, 46].

Для управления роботизированной системой требуется дистанционный контроль не только роботизированной руки, но и УЗ-сканера. Оригинальный способ управления УЗ-сканером на расстоянии предложили в своей работе Р. Arbeille и соавт. (2016 г.): в качестве программного решения авторы использовали программное обеспечение для удаленного доступа TeamViewer для управления сканером [47]. Сообщается, что время освоения специалистом УЗ-диагностики методики роботизированного УЗИ составляет 10 минут [48].

В анализируемых статьях описано использование роботизированных установок двух типов. Первый тип — кольцо различного диаметра, устанавливаемое при помощи медицинского работника над обследуемой областью, внутри которого находится датчик с приводом. Второй тип — роботизированная рука с 3–6 степенями свободы, работающая с пациентом, как правило, без помощи медицинского персонала в месте проведения исследования.

Многие исследователи использовали для работы с роботизированной УЗ-системой бесплатное расширение для Java — HORV с целью передачи видеоданных со сканера NetMeeting [48], что, несмотря на скоростное соединение 10 Мбит/с, позволяло получить только низкое качество изображения (CIF — Common Intermediate Format, 352×288 пикселей). Использование роботизированной УЗ-системы позволяет эксперту точнее управлять датчиком: роботизированная рука в точности повторяет все движения дистанционным манипулятором. Однако возникает проблема с контролем усилия, передаваемого датчиком: излишняя компрессия тканей приводит к деформации их ультразвукового изображения, что затрудняет оценку УЗ-картины.

На данный момент разработаны разные системы обратной связи, передающие усилие как от манипулятора на датчик, так и в обратном направлении [49], а также системы коррекции степени давления на датчик [50]. Альтернативный вариант предполагает алгоритм компенсации деформации тканей УЗ-датчиком при проведении 3D-реконструкции изображения [51]. Трехмерная реконструкция при проведении сканирования роботом — актуальная задача, позволяющая максимально точно вывести структуры на УЗ-изображении [52].

Роботизированные УЗ-системы нашли свою область применения — удаленно расположенные меди-

цинские учреждения в сельской местности, в которых оказалась востребована телемедицинская эхокардиография, совмещенная с консультацией кардиолога, что позволило сократить время ожидания консультации пациентом в среднем на 1 мес [53]. Для сельской местности стало актуальным обследование беременных. Роботизированная рука способна выполнять УЗИ беременных, проживающих в сельской местности, по качеству не уступающее местному специалисту [44]. Данная методика получила успешное распространение только в 2018 г., хотя эффективность выполнения роботизированного обследования малого таза некоторые авторы показали еще в 2003 г. [54].

Роботизированные УЗ-системы оказались востребованы и в операционной. Роботизированная рука проводила сканирование позвоночника и выполняла позиционирование проводника для иглы. Такая система показала высокую точность и позволила сократить лучевую нагрузку на пациента [55]. Аналогичный робот использовался в другом исследовании для проведения УЗ-контроля лучевой терапии рака предстательной железы [56]. Робот-хирург *da Vinci* также оснащен УЗ-датчиком и успешно выполнил 2D-ультразвуковое сканирование и эластографию [57].

В травматологии роботизированные УЗ-системы также нашли свое применение. По FAST-протоколу (*Focused assessment with sonography for trauma* — алгоритм ультразвукового обследования пациента с травмой) роботизированная система, фиксируемая на поверхности тела пациента и дистанционно контролируемая специалистом, проводит прицельное сканирование 4 областей менее чем за 5 минут во время транспортировки пострадавшего [58].

Для получения корректных срезов требуется большая точность позиционирования УЗ-датчика, что не всегда достижимо при дистанционном инструктировании человека с УЗ-датчиком в руках. Возможность точного позиционирования УЗ-датчика роботом позволяет не только выполнять корректные срезы, но и проводить уникальные исследования органов одновременно двумя УЗ-датчиками, причем один из них является передающим УЗ-сигнал, а другой — принимающим [59]. Данная методика повышает качество УЗ-картины, так как пространственная разрешающая способность УЗ в этом случае является равномерной во всем диапазоне глубин сканирования.

Хронология развития технологий и методов телеУЗИ представлена в **таблице**.

Следующий шаг в развитии роботизированных УЗ-систем — полностью автономное проведение сканирования (без участия специалиста). Ближе всего к этому подошли R. Којсеv и соавт. (2017 г.) [60]. Роботизированная установка с установленной камерой позволяла проводить автоматизированное сканирование, строить 3D-модель. Преимущество автоматизированного сканирования заключается в меньшей погрешности измерений по осям, а роль специ-

алиста УЗД сводится лишь к проведению измерений и оценке УЗ-картины.

Обсуждение

ТелеУЗИ как метод прошел большой путь от экспериментальных установок до компактных УЗ-сканеров, способных уместиться в кармане. К настоящему времени в зарубежной практике телеУЗИ получило широкое применение. Текущий уровень развития техники позволяет существенно минимизировать необходимость применения дополнительных средств обеспечения дистанционного УЗИ. Так, передать результаты проведенного исследования или изображение самого процесса исследования стало возможно при помощи смартфона [30, 32, 33]. Увеличение пропускной способности интернет-соединений через мобильную сеть, а также расширение зоны покрытия позволяет повысить качество передаваемого изображения и, соответственно, качества диагностического исследования [16, 28].

Одна из основных проблем, возникавших при проведении телеУЗИ, — контроль положения УЗ-датчика — в настоящее время также решена. Технология контроля положения УЗ-датчика эволюционировала от двухмерного (при помощи веб-камеры) к трехмерному. Трехмерный контроль положения датчика осуществляется при помощи специальных меток или 3D-камер. По мере реализации технологии 3D-контроля положения датчика в пространстве стали появляться роботизированные телеУЗИ-установки, позволяющие проводить исследования без особой помощи медицинского персонала [37].

Передача УЗ-датчика в управление роботу требует существенной проработки вопроса безопасности проведения медицинских манипуляций, который активно изучается. Так, разработаны устройства для контроля силы давления на УЗ-датчик [49, 50]. Однако в настоящее время ответственность за качество и безопасность проводимого исследования по-прежнему лежит на дистанционно расположенном операторе.

Для российской действительности роботизированная УЗ-установка с дистанционным оператором не является оптимальным решением с точки зрения ресурсов для реализации. Это обусловлено необходимостью дополнительных организационно-технических решений: организации защищенных каналов связи для управления роботом и получения изображений и рабочего места оператора дистанционной УЗ-установки, а также дополнительного обучения врача-оператора. Необходимо также учитывать немалую стоимость роботизированной установки. Например, стоимость коммерческого робота UR5, подготовленного для работы с УЗ-датчиком, составляет 31 900\$ без учета стоимости самого УЗ-сканера [61]. С этой точки зрения экономически выгоднее привлечение врача ультразвуковой диагностики и оснаще-

Таблица. Развитие технологий телеультразвуковых исследований

Table. The development of tele-ultrasound technology

Год	Уровень развития технологии	Альтернативные статьи
1997	Передача видео- и аудиосигнала из кабинета УЗИ в конференц-зал [4]. Реализация мини- PACS для ультразвука [5]	—
1998	Две технологии телеУЗИ: в режиме реального времени и по типу «сохраний и передавай» [6, 7]	[8, 9]
1999	Исследования телеУЗИ с передачей данных УЗИ по электронной почте [11]	[12]
2000	Разработано техническое решение привязки 3D -изображения к единой с пациентом системе координат [35]	—
2001	Использование технологии ISDN в телеУЗИ быстрее и эффективнее, чем работа курьерских служб по пересылке УЗ-данных на твердых носителях [10]. Применение дуплексных каналов связи [15]	[27]
2003	Применение спутниковых каналов связи [13]. Роботизированное телеУЗИ, уступающее по качеству «классическому» исполнению УЗИ [39]. Применение NetMeeting для передачи видеоданных с роботизированного УЗ-сканера [48]	[24, 40–42; 45, 46]
2004–2013	Разработка, применение и оптимизация алгоритмов сжатия данных УЗИ	[9, 14–23]
2005	Пересылка фотографий УЗИ с мобильного телефона на мобильный [30]	—
2008	Обоснование применения DICOM -стандарта в телеУЗИ [15, 24]	[25]
2009	Применение удаленного сервера для обработки данных УЗИ с мобильного сканера с целью получения 3D -изображения [34]. Система позиционирования датчика при помощи камеры и меток на датчике и теле пациента [36]	—
2010	Применение MMS -технологии для передачи видео УЗИ между мобильными телефонами [31]	—
2011	Применение iChat и Skype для телеУЗИ [16]	[28]
2014	Передача данных УЗИ с применением программно-аппаратных средств смартфона [32]	[33]
2016	Технологии автоматизированной обработки УЗ-изображения [38]. Качество роботизированного телеУЗИ не уступает качеству «классического» телеУЗИ [43]. Предложен способ управления дистанционным УЗ-сканером при помощи TeamViewer [47]. 3D -реконструкция при проведении сканирования роботизированной УЗ-системой [52]	—
2017	Системы для роботизированного УЗИ, передающие усилие не только от манипулятора на датчик, но и в обратном направлении [49], а также системы коррекции степени давления на датчик [50]. Исследования органов одновременно двумя УЗ-датчиками, когда один из них является передающим УЗ-сигнал, а другой — принимающим [59]	[51]
2018	Дистанционная оценка корректности установки УЗ-датчика посредством 3D -камеры [37]	

Примечание. ТелеУЗИ — телеультразвуковое исследование; **PACS** — система передачи и архивации изображений (**P**icture **A**rchiving and **C**ommunication **S**ystem); **ISDN** — передача цифрового сигнала по телефонным каналам с предоставлением различных служб (**I**ntegrated **S**ervices **D**igital **N**etwork); **DICOM** — международный стандарт создания, хранения, визуализации и передачи медицинских файлов (**D**igital **I**maging and **C**ommunications in **M**edicine); **MMS** — мультимедийные сообщения (**M**ultimedia **M**essaging **S**ervice); **3D** — трехмерное изображение (**t**hree-**d**imensional).

Note. ТелеУЗИ — Телеультразвуковое исследование; **PACS** — система передачи и архивации изображений (**P**icture **A**rchiving and **C**ommunication **S**ystem); **ISDN** — передача цифрового сигнала по телефонным каналам с предоставлением различных служб (**I**ntegrated **S**ervices **D**igital **N**etwork); **DICOM** — международный стандарт создания, хранения, визуализации и передачи медицинских файлов (**D**igital **I**maging and **C**ommunications in **M**edicine); **MMS** — мультимедийные сообщения (**M**ultimedia **M**essaging **S**ervice); **3D** — трехмерное изображение (**t**hree-**d**imensional).

ние его рабочего места там, где необходимо выполнение УЗИ. С учетом дефицита в профессиональных кадрах специалистов УЗИ решение проблемы видится в полностью автономном проведении исследования. На данный момент сведений о создании такого технического решения в научных источниках не обнаружено, однако, принимая во внимание настоящий уровень технического и технологического развития, можно сказать, что этот способ в обозримом будущем, вероятно, будет реализован.

Авторы строят предположение о возможности полностью автоматизированного исследования, без оператора, с автоматизированным позиционированием датчика, получением УЗ-изображения, его разметкой и последующим анализом на основе искусственного интеллекта (**рис. 2**).

Роль медицинского персонала будет ограничиваться инструктажем пациента, контролем корректности и безопасности его укладки, а также выбором не-

обходимых режимов исследования на автоматизированной установке. Дальнейшая роль медицинского персонала видится в контроле безопасности проводимого исследования и в контроле состояния пациента в процессе исследования. Доверять эти функции машине в настоящее время, как нам кажется, преждевременно. Большинству пациентов будет комфортнее, если они будут знать, что не остаются наедине с машиной.

Описанные выше обязанности больше соответствуют должностным обязанностям среднего медицинского персонала. При внедрении этой модели в практику рабочая загруженность врача УЗИ рутинными исследованиями уменьшится, в то время как большее количество времени будет уделяться исследованиям, связанным с УЗ-патологией, что позволит врачам ультразвуковой диагностики заниматься выявлением тяжелой патологии, повышая тем самым квалификацию.

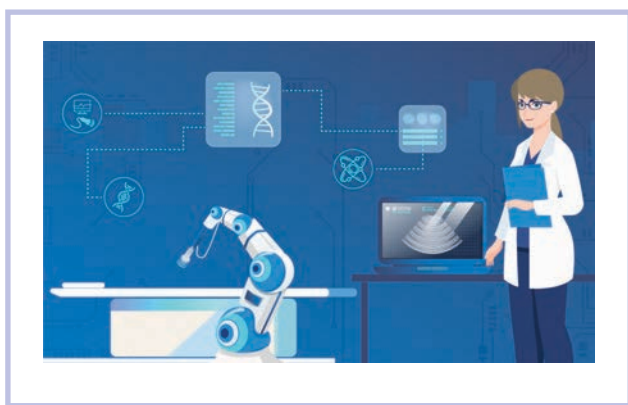


Рис. 2. Оснащение кабинета для проведения автоматизированного роботизированного ультразвукового исследования.
Fig. 2. Equipment for automated robotic ultrasound examination.

Ограничения

Настоящий обзор содержит некоторые ограничения. Возможно, некоторые статьи не оценены на предмет соответствия требованиям из-за ограничений, касающихся доступности полнотекстовых вариантов, или потому, что не изложены на английском или русском языке. Некоторые статьи могли быть не проиндексированы в библиографических базах данных.

Среди статей, включенных в обзор, отмечается существенная неоднородность, что связано с постановкой авторами различных целей и получением различающихся результатов и выводов. Применение различных способов и методов, в том числе УЗ-аппаратуры разных классов, привело к широкому разбросу данных при сравнении исследований. Многие из описанных результатов, связанных с технической реализацией, а также качеством изображения, имели субъективную оценку авторами исследований. Параметры регистрировались без надлежащего использования стандартизированных способов оценки, а также без подтверждающих измерений. Настоящий

обзор посвящен технологиям телеУЗИ, по этой причине предвзятость авторов некоторых статей к выбору и включению в исследования пациентов не имеет существенного значения. Однако предвзятость в отношении выбора оцениваемых результатов приводит к увеличению риска систематической ошибки в исследованиях, снижая статистическую значимость полученных результатов.

Таким образом, описанные выше факты не позволяют провести качественную статистическую обработку этих исследований, а также метаанализ.

Заключение

В настоящее время телеультразвуковое исследование является активно развивающейся и доступной технологией и по качеству выполняемого исследования приближается к традиционному ультразвуковому исследованию. Развитие технологии телеультразвуковых исследований, а именно роботизированного ультразвукового исследования, позволяет провести трансформацию метода из оператор-зависимого в оператор-независимый.

Дальнейшее применение технологий искусственного интеллекта дает возможность проведения автоматизированного анализа ультразвуковой картины. Таким образом, в ближайшем будущем телеультразвуковые исследования могут стать источником объективной информации, что существенно повысит точность диагностики.

Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования — Арзамасов К.М., Дроговоз В.А.

Сбор и обработка материала — Арзамасов К.М.

Написание текста — Арзамасов К.М.

Редактирование — Дроговоз В.А.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Bassignani MJ, Dwyer SJ, Ciambotti JM, Olazagasti JM, Moran R, Moynihan S, Weaver AC, Snyder AM. Review of technology: Planning for the development of telesonography. *Journal of Digital Imaging*. 2004;17(1):18-27. <https://doi.org/10.1007/s10278-003-1721-4>
- Liberati A, Altman DG, Tetzlaff J, Mulrow C, Gotzsche PC, Ioannidis JP, Clarke M, Devereaux PJ, Kleijnen J, Moher D. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration. *BMJ*. 2009;339:b2700. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2700>
- Ouzzani M, Hammady H, Fedorowicz Z, Elmagarmid A. Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*. 2016;5(1):210. <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Duerinckx AJ, Hayrapetian A, Melany M, Valentino DJ, Rahbar D, Kiszonas M, Franco R, Narin SL, Ragavendra N, Grant EG. Real-time sonographic video transfer using asynchronous transfer mode technology. *AJR. American Journal of Roentgenology*. 1997;168(5):1353-1355. <https://doi.org/10.2214/ajr.168.5.9129443>
- Henri CJ, Rubin RK, Cox RD, Bret PM. Design and implementation of World Wide Web-based tools for image management in

- computed tomography, magnetic resonance imaging, and ultrasonography. *Journal of Digital Imaging*. 1997;10(3 Suppl 1):77-79. <https://doi.org/10.1007/bf03168663>
6. Johnson MA, Davis P, McEwan AJ, Jhangri GS, Warshawski R, Gargum A, Ethier J, Anderson WW. Preliminary findings from a teleultrasound study in Alberta. *Telemedicine Journal: the Official Journal of the American Telemedicine Association*. 1998;4(3):267-276. <https://doi.org/10.1089/tmj.1.1998.4.267>
 7. Malone FD, Athanassiou A, Craigo SD, Simpson LL, D'Alton ME. Cost issues surrounding the use of computerized telemedicine for obstetric ultrasonography. *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology: the Official Journal of the International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. 1998;12(2):120-124. <https://doi.org/10.1046/j.1469-0705.1998.12020120.x>
 8. Sutherland JE, Sutphin HD, Rawlins F, Redican K, Burton J. A comparison of teleultrasound with standard ultrasound care in a rural Dominican clinic. *Journal of Telemedicine and Telecare*. 2009;15(4):191-195. <https://doi.org/10.1258/jtt.2009.080909>
 9. Otto C, Comtois JM, Sargsyan A, Dulchavsky A, Rubinfeld I, Dulchavsky S. The Martian chronicles: Remotely guided diagnosis and treatment in the arctic circle. *Surgical Endoscopy*. 2010;24(9):2170-2177. <https://doi.org/10.1007/s00464-010-0917-1>
 10. Mehta AR, Wakefield DS, Kienzle MG, Scholz TD. Pediatric tele-echocardiography: evaluation of transmission modalities. *Telemedicine Journal and E-health: the Official Journal of the American Telemedicine Association*. 2001;7(1):17-25. <https://doi.org/10.1089/153056201300093831>
 11. Balestri R, Cavina E, Aliferis A, Goletti O, Rocci R, Lippolis PV, Zocco G, Franceschi M, Cotrozzi A, Economou S, Christofidis E. Telemedicine on a small island. *Journal of Telemedicine and Telecare*. 1999;5(Suppl 1):50-52. <https://doi.org/10.1258/1357633991932531>
 12. Nikolić N, Mozetić V, Modrcin B, Jakić S. Might teleultrasound be a new useful diagnostic tool aboard merchant ships? A pilot study. *International Maritime Health*. 2006;57(1-4):1-4.
 13. Strode CA, Rubal BJ, Gerhardt RT, Bulgrin JR, Boyd SYN. Wireless and satellite transmission of prehospital focused abdominal sonography for trauma. *Prehospital Emergency Care: Official Journal of the National Association of EMS Physicians and the National Association of State EMS Directors*. 2003;7(3):375-379. <https://doi.org/10.1080/10903120390936608>
 14. Moore PT, O'Hare N, Walsh KP, Ward N, Conlon N. Objective video quality measure for application to tele-echocardiography. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 2008;46(8):807-813. <https://doi.org/10.1007/s11517-008-0364-5>
 15. Takeuchi R, Harada H, Masuda K, Ota G, Yokoi M, Teramura N, Saito T. Field testing of a remote controlled robotic tele-echo system in an ambulance using broadband mobile communication technology. *Journal of Medical Systems*. 2008;32(3):235-242. <https://doi.org/10.1007/s10916-008-9128-x>
 16. Liteplo AS, Noble VE, Attwood BHC. Real-time video streaming of sonographic clips using domestic internet networks and free videoconferencing software. *Journal of Ultrasound in Medicine: Official Journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine*. 2011;30(11):1459-1466. <https://doi.org/10.7863/jum.2011.30.11.1459>
 17. Panayides A, Antoniou ZC, Mylonas Y, Pattichis MS, Pitsillides A, Pattichis CS. High-resolution, low-delay, and error-resilient medical ultrasound video communication using H.264/AVC over mobile WiMAX networks. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2013;17(3):619-628. <https://doi.org/10.1109/TITB.2012.2232675>
 18. Ferreira AC, Araujo Júnior E, Martins WP, Jordão JF, Oliani AH, Meagher SE, Da Silva Costa F. Trans-Pacific tele-ultrasound im-
 - age transmission of fetal central nervous system structures. *The Journal of Maternal-Fetal and Neonatal Medicine: the Official Journal of the European Association of Perinatal Medicine, the Federation of Asia and Oceania Perinatal Societies, the International Society of Perinatal Obstetricians*. 2015;28(14):1706-1710. <https://doi.org/10.3109/14767058.2014.966674>
 19. Yoo SK, Kim DK, Jung SM, Kim E-K, Lim JS, Kim JH. Performance of a web-based, realtime, tele-ultrasound consultation system over high-speed commercial telecommunication lines. *Journal of Telemedicine and Telecare*. 2004;10(3):175-179. <https://doi.org/10.1258/135763304323070841>
 20. Courreges F, Vieyres P, Istepanian RSH, Arbeille P, Bru C. Clinical trials and evaluation of a mobile, robotic tele-ultrasound system. *Journal of Telemedicine and Telecare*. 2005;11(Suppl 1):46-49. <https://doi.org/10.1258/1357633054461552>
 21. Popov V, Popov D, Kacar I, Harris RD. The feasibility of real-time transmission of sonographic images from a remote location over low-bandwidth Internet links: a pilot study. *AJR. American Journal of Roentgenology*. 2007;188(3):219-222. <https://doi.org/10.2214/AJR.05.2148>
 22. Martini MG, Istepanian RSH, Mazzotti M, Philip N. A cross-layer approach for wireless medical video streaming in robotic teleultrasound. *29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2007;3082-3085. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4352979>
 23. Paulus YM, Thompson NP. Inexpensive, realtime tele-ultrasound using a commercial, web-based video streaming device. *Journal of Telemedicine and Telecare*. 2012;18(4):185-188. <https://doi.org/10.1258/jtt.2012.110112>
 24. Sengupta PP, Narula N, Modesto K, Doukky R, Doherty S, Soble J, Narula J. Feasibility of intercity and trans-Atlantic telerobotic remote ultrasound: assessment facilitated by a nondedicated bandwidth connection. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2014;7(8):804-809. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2014.03.014>
 25. Gackowski A, Czekiarda L, Chrustowicz A, Cała J, Nowak M, Sadowski J, Podolec P, Pasowicz M, Zieliński K. Development, implementation, and multicenter clinical validation of the TeleDICOM-advanced, interactive teleconsultation system. *Journal of Digital Imaging*. 2011;24(3):541-551. <https://doi.org/10.1007/s10278-010-9303-8>
 26. Rosen MP, Mehta TS, Bromberg R, Kelly SL, Levine D. Remote sonographic interpretation using a laser printer network: system performance and diagnostic accuracy in actual clinical practice. *AJR. American Journal of Roentgenology*. 2001;176(4):855-860. <https://doi.org/10.2214/ajr.176.4.1760855>
 27. Carbone M, Ferrari V, Marconi M, Piazza R, Del Corso A, Adami D, Lucchesi Q, Pagni V, Berchiolli R. A tele-ultrasound platform to collect specialist second opinion in less specialized hospitals. *Updates in Surgery*. 2018;70(3):407-413. <https://doi.org/10.1007/s13304-018-0582-9>
 28. Jensen SH, Duvald I, Aagaard R, Primdahl SC, Petersen P, Kirkegaard H, Weile J. Remote Real-Time Ultrasound Supervision via Commercially Available and Low-Cost Tele-Ultrasound: a Mixed Methods Study of the Practical Feasibility and Users' Acceptability in an Emergency Department. *Journal of Digital Imaging*. 2019;32(5):841-848. <https://doi.org/10.1007/s10278-018-0157-9>
 29. Adambounou K, Farin F, Boucher A, Adjenou KV, Gbeassor M, N'dakena K, Vincent N, Arbeille P. Preliminary experience with tele-sonography and tele-mammography in Togo. *Diagnostic and Interventional Imaging*. 2012;93(7-8):639-642. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2012.03.020>
 30. Blaivas M, Lyon M, Duggal S. Ultrasound image transmission via camera phones for overreading. *The American Journal of Emergency Medicine*. 2005;23(4):433-438. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2004.09.037>

31. Lim TH, Choi HJ, Kang BS. Feasibility of dynamic cardiac ultrasound transmission via mobile phone for basic emergency teleconsultation. *Journal of Telemedicine and Telecare*. 2010;16(5):281-285. <https://doi.org/10.1258/jtt.2010.091109>
32. Miyashita T, Iketani Y, Nagamine Y, Goto T. FaceTime® for teaching ultrasound-guided anesthetic procedures in remote place. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*. 2014;28(2):211-215. <https://doi.org/10.1007/s10877-013-9514-x>
33. Kim C, Cha H, Kang BS, Choi HJ, Lim TH, Oh J. A Feasibility Study of Smartphone-Based Telesonography for Evaluating Cardiac Dynamic Function and Diagnosing Acute Appendicitis with Control of the Image Quality of the Transmitted Videos. *Journal of Digital Imaging*. 2016;29(3):347-356. <https://doi.org/10.1007/s10278-015-9849-6>
34. Meir A, Rubinsky B. Distributed network, wireless and cloud computing enabled 3-D ultrasound; a new medical technology paradigm. *PLoS One*. 2009;4(11):e7974. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0007974>
35. Tuomola PM, Gee AH, Prager RW, Berman L. Body-centered visualisation for freehand 3-D ultrasound. *Ultrasound in Medicine and Biology*. 2000;26(4):539-550. [https://doi.org/10.1016/S0301-5629\(00\)00142-3](https://doi.org/10.1016/S0301-5629(00)00142-3)
36. Yoshinaga T, Horiguchi T, Miyazaki W, Masuda K. Development of 3D space-sharing interface using augmented reality technology for domestic tele-echography. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2009;6103-6106. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5334928>
37. Stember JN. Three-Dimensional Surface Point Cloud Ultrasound for Better Understanding and Transmission of Ultrasound Scan Information. *Journal of Digital Imaging*. 2018;31(6):904-911. <https://doi.org/10.1007/s10278-017-0046-7>
38. Dey N, Bose S, Das A, Chaudhuri SS, Saba L, Shafique S, Nicolaides A, Suri JS. Effect of Watermarking on Diagnostic Preservation of Atherosclerotic Ultrasound Video in Stroke Telemedicine. *Journal of Medical Systems*. 2016;40(4):91. <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0451-3>
39. Arbeille P, Ruiz J, Herve P, Chevillot M, Poisson G, Perrotin F. Fetal tele-echography using a robotic arm and a satellite link. *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology: the Official Journal of the International Society of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. 2005;26(3):221-226. <https://doi.org/10.1002/uog.1987>
40. Arbeille P, Capri A, Ayoub J, Kieffer V, Georgescu M, Poisson G. Use of a robotic arm to perform remote abdominal telesonography. *AJR. American Journal of Roentgenology*. 2007;188(4):317-322. <https://doi.org/10.2214/AJR.05.0469>
41. Martinelli T, Bosson JL, Bressollette L, Pelissier F, Boidard E, Troccaz J, Cinquin P. Robot-based tele-echography: clinical evaluation of the TER system in abdominal aortic exploration. *Journal of Ultrasound in Medicine: Official Journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine*. 2007;26(11):1611-1616. <https://doi.org/10.7863/jum.2007.26.11.1611>
42. Adams SJ, Burbridge BE, Badea A, Langford L, Vergara V, Bryce R, Bustamante L, Mendez IM, Babyn PS. Initial Experience Using a Telerobotic Ultrasound System for Adult Abdominal Sonography. *Canadian Association of Radiologists Journal*. 2017;68(3):308-314. <https://doi.org/10.1016/j.carj.2016.08.002>
43. Georgescu M, Saccomandi A, Baudron B, Arbeille PL. Remote Sonography in Routine Clinical Practice Between Two Isolated Medical Centers and the University Hospital Using a Robotic Arm: A 1-Year Study. *Telemedicine Journal and E-health: the Official Journal of the American Telemedicine Association*. 2016;22(4):276-281. <https://doi.org/10.1089/tmj.2015.0100>
44. Adams SJ, Burbridge BE, Badea A, Kanigan N, Bustamante L, Babyn P, Mendez I. A Crossover Comparison of Standard and Telerobotic Approaches to Prenatal Sonography. *Journal of Ultrasound in Medicine: Official Journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine*. 2018;37(11):2603-2612. <https://doi.org/10.1002/jum.14619>
45. Vieyres P, Poisson G, Courreges F, Merigeaux O, Arbeille P. The TERESA project: from space research to ground tele-echography. *The Industrial Robot*. 2003;30(1):77-82. <https://doi.org/10.1108/01439910310457742>
46. Delgorge C, Courrèges F, Al Bassit L, Novales C, Rosenberger C, Smith-Guerin N, Brù C, Gilabert R, Vannoni M, Poisson G, Vieyres P. A tele-operated mobile ultrasound scanner using a lightweight robot. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine: a Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2005;9(1):50-58. <https://doi.org/10.1109/TITB.2004.840062>
47. Arbeille P, Zuj K, Saccomandi A, Ruiz J, Andre E, de la Porte C, Carles G, Blouin J, Georgescu M. Teleoperated Echograph and Probe Transducer for Remote Ultrasound Investigation on Isolated Patients (Study of 100 Cases). *Telemedicine Journal and E-health: the Official Journal of the American Telemedicine Association*. 2016;22(7):599-607. <https://doi.org/10.1089/tmj.2015.0186>
48. Masuda K, Tateishi N, Kimura E, Ishihara K. Development of a tele-echography system by using an echographic diagnosis robot. *Japanese Journal of Medical Physics: an Official Journal of Japan Society of Medical Physics*. 2003;23(1):24-29.
49. Fang T-Y, Zhang HK, Finocchi R, Taylor RH, Boctor EM. Force-assisted ultrasound imaging system through dual force sensing and admittance robot control. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2017;12(6):983-991. <https://doi.org/10.1007/s11548-017-1566-9>
50. Kim YJ, Seo JH, Kim HR, Kim KG. Development of a control algorithm for the ultrasound scanning robot (NCCUSR) using ultrasound image and force feedback. *The International Journal of Medical Robotics + Computer Assisted Surgery: MRCAS*. 2017;13(2):10.1002/rcs.1756. <https://doi.org/10.1002/rcs.1756>
51. Virga S, Gobl R, Baust M, Navab N, Hennesperger C. Use the force: deformation correction in robotic 3D ultrasound. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2018;13(5):619-627. <https://doi.org/10.1007/s11548-018-1716-8>
52. Merouche S, Allard L, Montagnon E, Soulez G, Bigras P, Cloutier G. A Robotic Ultrasound Scanner for Automatic Vessel Tracking and Three-Dimensional Reconstruction of B-Mode Images. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2016;63(1):35-46. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2015.2499084>
53. Boman K, Olofsson M, Berggren P, Sengupta PP, Narula J. Robot-assisted remote echocardiographic examination and teleconsultation: a randomized comparison of time to diagnosis with standard of care referral approach. *JACC. Cardiovascular Imaging*. 2014;7(8):799-803. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2014.05.006>
54. Vilchis A, Masuda K, Troccaz J, Cinquin P. Robot-based tele-echography: the TER system. *Studies in Health Technology and Informatics*. 2003;95:212-217.
55. Esteban J, Simson W, Requena Witzig S, Rienmüller A, Virga S, Frisch B, Zettinig O, Sakara D, Ryang YM, Navab N, Hennesperger C. Robotic ultrasound-guided facet joint insertion. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2018;13(6):895-904. <https://doi.org/10.1007/s11548-018-1759-x>
56. Schluter M, Gerlach S, Furweger C, Schlaefer A. Analysis and optimization of the robot setup for robotic-ultrasound-guided radiation therapy. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2019;14(8):1379-1387. <https://doi.org/10.1007/s11548-019-02009-w>

57. Schneider C, Baghani A, Rohling R, Salcudean S. Remote ultrasound palpation for robotic interventions using absolute elastography. *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*. 2012;15(Pt 1):42-49. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33415-3_6
58. Ito K, Sugano S, Takeuchi R, Nakamura K, Iwata H. Usability and performance of a wearable tele-echography robot for focused assessment of trauma using sonography. *Medical Engineering and Physics*. 2013;35(2):165-171. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2012.04.011>
59. Aalamifar F, Khurana R, Cheng A, Guo X, Iordachita I, Bector EM. Enabling technologies for robot assisted ultrasound tomography. *The International Journal of Medical Robotics + Computer Assisted Surgery: MRCAS*. 2017;13(1):10.1002/rcs.1746. <https://doi.org/10.1002/rcs.1746>
60. Kojcev R, Khakzar A, Fuerst B, Zettinig O, Fahkry C, DeJong R, Richmon J, Taylor R, Sinibaldi E, Navab N. On the reproducibility of expert-operated and robotic ultrasound acquisitions. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2017;12(6):1003-1011. <https://doi.org/10.1007/s11548-017-1561-1>
61. Mathiassen K, Fjellin JE, Glette K, Hol PK, Elle OJ. An Ultrasound Robotic System Using the Commercial Robot UR5. *Frontiers Robotics AI*. [Internet]. 2016;3. <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00001>

Поступила 02.06.2020

Received 02.06.2020

Принята к печати 10.06.2020

Accepted 10.06.2020