

Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий

УДК 005:004.75:004.031.43

Обзорная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-5-7-23>

## Магнитометрия, акустические и инерциальные технологии локального позиционирования в здравоохранении

И. В. Черепанова<sup>✉</sup>, И. В. Поспелова, Д. С. Брагин, В. Н. Серебрякова

Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, Томск, Россия

<sup>✉</sup> [iv-sushkova@mail.ru](mailto:iv-sushkova@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Определение местоположения подвижных объектов в закрытых помещениях обретает все большую актуальность в сфере здравоохранения. Слежение за перемещениями пациентов в режиме реального времени позволяет оказывать им своевременную медицинскую помощь при резком ухудшении жизненных показателей. Особенно важно отслеживать местоположение пациентов, перенесших хирургические вмешательства, так как риск наступления смерти вследствие возникновения послеоперационных осложнений для них крайне высок. Применение технологий локального позиционирования в составе телемедицинских систем позволяет решить указанную проблему, тем самым снизив уровень смертности пациентов и повысив качество медицинского обслуживания.

**Цель работы.** Изучение применимости магнитометрии, инерциальных и акустических технологий для локализации пациента в здании клиники.

**Материалы и методы.** Проведен анализ отечественных и зарубежных научных источников, посвященных локальному позиционированию на базе перечисленных технологий. Включенные в обзор работы опубликованы не ранее 2016 г. Большинство из них представлено в журналах с *impact*-фактором не ниже 3.

**Результаты.** В результате анализа сделан вывод о том, что ни одна из рассмотренных технологий не может использоваться самостоятельно. Инерциальные датчики обладают высокой точностью, но со временем погрешность измерений возрастает, поэтому они нуждаются в постоянной корректировке. Позиционирование на базе геомагнитного поля затрудняется помехами, вызываемыми работой аппаратов магнитно-резонансной томографии и рентгеновскими установками, повсеместно использующимися в медицинских учреждениях. Активная магнитометрия также имеет ряд недостатков, затрудняющих локальное позиционирование. Позиционирование на базе ультразвука может осложняться помехами, возникающими в результате работы аппаратов УЗИ. Использование слышимого звука создает шумовое загрязнение и негативно влияет на здоровье пациентов. Помимо этого акустические технологии не способны обеспечить безопасный канал связи для обмена данными.

**Заключение.** Рекомендовано комбинировать рассмотренные технологии позиционирования с другими технологиями в целях устранения обозначенных недостатков.

**Ключевые слова:** IPS, телемедицина, магнитометрия, инерциальное позиционирование, ультразвуковое позиционирование

**Для цитирования:** Магнитометрия, акустические и инерциальные технологии локального позиционирования в здравоохранении / И. В. Черепанова, И. В. Поспелова, Д. С. Брагин, В. Н. Серебрякова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 5. С. 7–23. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-5-7-23

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 18.05.2020; принята к публикации после рецензирования 31.08.2020; опубликована онлайн 25.11.2020



## Magnetometry, Acoustical and Inertial Indoor-Positioning in Healthcare

Irina V. Cherepanova✉, Irina V. Pospelova, Dmitriy S. Bragin, Victoria N. Serebryakova

Cardiology Research Institute, Tomsk National Research  
Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

✉ iv-sushkova@mail.ru

### Abstract

**Introduction.** The problem of localization of moving objects inside buildings becomes more urgent in healthcare. Tracking the movements of patients in real time allows one to provide them with timely medical support in case of sharp deterioration in their vital signs. It is especially important to track the location of patients undergoing a surgery, since the risk of death due to postoperative complications for them is extremely high. Using indoor-positioning technologies in telemedicine systems can solve the problem, thereby reducing the mortality rate of patients and improving the quality of medical care.

**Aim.** To study the applicability of magnetometry, inertial and acoustic technologies for patient's localization in a hospital.

**Materials and methods.** The analysis of domestic and foreign scientific sources devoted to indoor-positioning based on the above technologies was carried out. Material published not earlier than 2016, was chosen for the analysis. Most of the papers were published in journals with impact-factor not lower than 3.

**Results.** After analyzing the information received, it was concluded that none of the technologies can be used independently. Inertial sensors possess high accuracy, but over time, the measurement error increases. Therefore, the sensors need to regular correction. Indoor-positioning based on geomagnetism is hampered by interference that can be induced by the operation of magnetic resonance imaging scanners and X-ray equipment, which are usually used in medical facilities. Active magnetometry does not allow to keep track of moving objects due to specific of hardware used. Ultrasound-based positioning can be complicated by ultrasonography apparatuses interference. Using an audible sound creates noise pollution and exerts a negative impact on patient's health. Also, acoustic technologies are unable to provide a secure communication channel for data exchange.

**Conclusion.** It is recommended to combine the reviewed positioning technologies with other technologies in order to correct the indicated disadvantages.

**Keywords:** IPS, telemedicine, magnetometry, inertial positioning, acoustical positioning

---

**For citation:** Cherepanova I. V., Pospelova I. V., Bragin D. S., Serebryakova V. N. Magnetometry, Acoustical and Inertial Indoor-Positioning in Healthcare. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 5. pp. 7–23. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-5-7-23

---

**Conflict of interest.** The authors declare that there are no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Submitted 18.05.2020; accepted 31.08.2020; published online 25.11.2020

---

**Введение.** Определение местоположения объектов внутри помещений является актуальной задачей в современном мире, так как оно позволяет осуществлять контроль за людьми и техникой, тем самым повышая эффективность и безопасность производства. В связи с этим локальное позиционирование востребовано во многих отраслях человеческой деятельности. Медицина не является исключением. Локальное позиционирование успешно применяется в составе телемедицинских

систем для отслеживания местоположения пациентов в режиме реального времени. Одним из наиболее важных направлений применения систем локального позиционирования является слежение за перемещениями пациентов, перенесших сложные хирургические вмешательства: при резком ухудшении жизненных показателей в связи с послеоперационными осложнениями важно вовремя обнаружить пациента и оказать ему необходимую медицинскую помощь.

Технологии глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС, наземные сотовые сети) подходят для навигации на открытой местности, однако не могут использоваться для локализации небольших подвижных объектов внутри закрытых помещений в силу ряда факторов. На использование средств глобальной навигации могут влиять стены и перекрытия, а также помехи, вызванные использованием бытовой и электрической техники [1–6], снижая точность позиционирования до десятков, а иногда и сотен метров. Помимо этого, в глубине помещения возможна полная потеря спутникового сигнала [2–6]. Вследствие указанных недостатков необходимо использовать иные решения, обладающие большей надежностью и точностью позиционирования [1–6]. В настоящее время существует множество методов, на базе которых разрабатываются программно-аппаратные системы позиционирования объектов внутри помещения, именуемые Indoor Positioning System (IPS). Выбор той или иной технологии зависит от области применения IPS.

Существует множество технологий indoor-позиционирования [1–6]:

- оптическое позиционирование, основанное на свойствах светового излучения;
- инерциальное позиционирование, основанное на оценке текущей позиции объекта с учетом его ранее известной позиции, скорости и направления движения;
- радиочастотное позиционирование, позволяющее определять местоположение объектов при помощи радиоволн различной частоты;
- позиционирование, основанное на свойствах ультразвука и акустики;
- позиционирование на базе машинного зрения;
- позиционирование, основанное на свойствах магнитного поля (магнитометрия);
- гибридное позиционирование, которое может объединять несколько разных технологий.

В настоящее время существует ряд коммерческих решений для развертывания медицинских IPS на базе перечисленных технологий:

- Real Trac [7] – модульная система позиционирования и связи для медицины. Данная система основана на радиочастотной технологии и позволяет отслеживать местоположение персонала, пациентов и оборудования в здании клиники.
- Situm indoor positioning [8] – гибридная система indoor-навигации, совмещающая магнито-

метрию, инерциальную и радиочастотную технологии. Система позволяет отслеживать местоположение пациентов, управлять размещением госпитализированных пациентов в клинике, обеспечивать контроль доступа в помещения и т. д.

- InfSoft Smart Connected Locations [9] – гибридная медицинская IPS, совмещающая оптическое и радиочастотное позиционирование (инфракрасное излучение и технологию Bluetooth Low Energy). Система предназначена для отслеживания положения пациентов в здании госпиталя. Помимо слежения за перемещением пациентов система оповещает медицинский персонал в случае падения пациента, а также в случае перемещения пациентов, которым нельзя вставать с постели по медицинским показаниям.

- Navigine [10] – медицинская IPS на базе радиочастотной технологии, позволяющая отслеживать положение пациентов в здании клиники в режиме реального времени. Для взаимодействия системы с диспетчером используется web-интерфейс.

- Indoors Healthcare [11] – еще одна медицинская IPS на базе радиочастотных технологий, позволяющая отслеживать положение пациентов, персонала и оборудования в режиме реального времени. Наряду с этим система предоставляет мобильное предложение для пациентов, облегчающее навигацию по зданию клиники.

Возможность применения некоторых из перечисленных технологий позиционирования в рамках создания IPS более детально рассмотрена в [1–4, 12, 13].

Целью настоящей статьи является изучение возможности применения магнитометрии, инерциальных и акустических технологий позиционирования для разработки медицинских IPS.

**Выбор оценочных критериев.** Для оценки применимости рассматриваемых технологий для indoor-позиционирования внутри медицинских учреждений необходимо обозначить ряд критериев:

- точность позиционирования: положение объектов должно определяться с точностью до конкретного помещения и погрешность не должна превышать 1...2 м;
- возможность однозначной идентификации контролируемых объектов;
- радиус действия связи;
- помехоустойчивость: медицинские учреждения оборудованы техникой, которая может создавать сильные электромагнитные помехи, при-

водящие к ухудшению качества связи и значительному снижению точности позиционирования;

- безопасность канала связи: технология должна обеспечивать безопасную передачу данных;
- высокая пропускная способность канала связи: скорость передачи данных должна быть достаточной для того, чтобы обеспечить позиционирование в режиме реального времени;
- небольшие масса и габариты используемого оборудования;
- низкий уровень энергопотребления;
- простота развертывания и обслуживания IPS.

**Инерциальная технология.** Инерциальная технология основана на оценке текущей позиции объекта с учетом его ранее известной позиции, скорости и направления движения [1–3]. Указанная технология строится на базе цифровых инерциальных датчиков (акселерометров, гироскопов, датчиков углового положения и др. [1, 2, 4, 14, 15]). Для определения положения объекта инерциальная технология использует метод навигационного счисления пути, также называемый методом инерциальной навигации.

Основная задача метода заключается в определении среднего шага, так как длина человеческого шага непостоянна: она зависит от скорости движения объекта, его роста и т. д. Также необходимо распознавать начала каждого нового шага, возникающего в процессе человеческой ходьбы. Человеческая ходьба имеет циклическую природу, и ее можно разделить на 4 основные фазы:

- отталкивание опорной ногой от земли;
- выпрямление переносной ноги;
- наклон голени опорной ноги вперед и начало переноса центра тяжести на переносную ногу;
- отталкивание опорной ноги от пола (после этого она становится переносной) и окончание переноса центра тяжести на переносную ногу, которая, в свою очередь, становится опорной.

Первая и третья фазы цикла ходьбы характеризуются повышением опорной реакции, вторая и четвертая – ее понижением. Факт шага определяется при распознавании каждой из двух этих групп фаз. Для расчета средней длины шага используются различные методы: эмпирические, аппроксимационные, методы, основанные на интегрировании ускорения пройденного шага, и пр.

Также для определения положения объекта необходимо знать направление его движения, которое можно определить на основе показаний, полученных от акселерометра и гироскопа.

Использование indoor-позиционирования на базе инерциальных датчиков обладает рядом преимуществ [4, 14–27]:

- автономностью и простотой развертывания. Для определения положения объекта достаточно только инерциальных датчиков и не требуется никакой дополнительной инфраструктуры и оборудования. Учитывая, что большинство современных мобильных устройств связи оборудованы встроенными акселерометрами и гироскопами, нет необходимости в разработке отдельных инерциальных датчиков;
- помехоустойчивостью. Существующие виды помех не влияют на точность измерений.

Главным недостатком инерциальной технологии является накопление погрешности измерений и, как следствие, уменьшение точности позиционирования с течением времени [1, 2, 4, 14–17]. Указанный недостаток является основной проблемой, возникающей при разработке инерциальных IPS. Для ее устранения применяются различные программные фильтры, но этого, зачастую, оказывается недостаточно. Вследствие этого в системах indoor-позиционирования только инерциальная технология используется редко [3, 14]. Чаще всего для повышения точности позиционирования инерциальную технологию совмещают с другими технологиями позиционирования [2–4, 16, 18–27].

Наиболее распространено совмещение инерциальной технологии с магнитометрией, радиочастотной и оптической технологиями, а также с машинным зрением. В качестве радиочастотной составляющей наиболее часто используются технологии Wi-Fi [28], Bluetooth [22] и ZigBee [23]. Для реализации IPS в помещениях монтируются широкополосные радиочастотные датчики. Активный маяк состоит из инерциальных датчиков и микросхемы с радиопередающим модулем. Местоположение объекта вычисляется с использованием данных, передаваемых по радиоканалу (чаще всего на базе метода Received Signal Strength Indicator (RSSI) и алгоритма трилатерации). Инерциальная составляющая при этом используется для повышения точности позиционирования и корректировки положения объекта, вычисленного на основании данных, полученных радиочастотной составляющей IPS.

При совмещении инерционной и оптической технологий чаще всего используются ИК-технологии [18] или Visible Light Communication (VLC) [19–21]. Инерциальная составляющая играет

вспомогательную роль и используется для повышения точности позиционирования: активный маяк дополнительно оснащается инерциальной системой, измеряющей относительное перемещение объекта. Маяк может выполняться в виде самостоятельного устройства [18–20], либо в качестве него используется мобильное устройство, оснащенное камерой и инерциальными датчиками [19–21].

IPS на основе комбинации инерциальной технологии и технологии машинного зрения [16, 24, 25] в дополнение к инерциальным датчикам используют видеокамеры. Камера в режиме реального времени фиксирует информацию об окружающей среде, которая анализируется средствами машинного зрения. Анализируя полученные изображения, алгоритмы машинного зрения способны определить траекторию движения объекта относительно визуальных ориентиров, хранящихся в базе данных системы. Визуальная информация, полученная в результате работы алгоритмов машинного зрения, также может быть использована для построения цифровой карты помещения с целью упрощения позиционирования в дальнейшем. Чаще всего в таких системах используются инерциальные датчики и камера мобильного устройства. Для реализации машинного зрения могут применяться как уже готовые платформы (в [24] используется платформа Google Tango), так и самостоятельно разработанные алгоритмы [16, 25]. Инерциальное и визуальное позиционирование функционируют независимо друг от друга. Измеренная информация сопоставляется, и на основе полученных результатов вычисляется точное положение объекта.

IPS, комбинирующие инерциальную технологию с магнитометрией [23, 26, 27], помимо акселерометра и гироскопа используют магнитометр. Роль инерциальной составляющей в таких IPS зависит от типа архитектуры, на базе которой реализована магнитометрическая часть (активная или пассивная). Более подробно этот вопрос раскрыт в разделе статьи, посвященной магнитометрии.

При позиционировании на базе только инерциальной технологии требуется одновременное использование нескольких видов инерциальных датчиков [14, 17]. Так как инерциальные датчики, используемые в мобильных устройствах, имеют большую погрешность измерений, использование только мобильных устройств в таких системах невозможно [3, 14]. Для IPS разрабатывается отдель-

ное устройство, в состав которого входят инерциальные датчики с более высокой точностью. Полученное устройство обычно закрепляется на стопе объекта, местоположение которого необходимо определять [14, 26]. Позиционирование осуществляется за счет фиксации траектории движения стопы пользователя в момент осуществления им шага. Главная сложность такого рода систем заключается в определении самого факта человеческого шага и в исключении возможности распознавания ложных шагов, так как это может привести к ошибке вычислений. В связи с этим данные, полученные с инерциальных датчиков, подвергаются сложной математической обработке.

Для увеличения точности позиционирования в некоторых системах используются цифровые карты и планы зданий [14, 17, 25]. На базе цифровой карты строится связный граф, ребрами которого являются все возможные пути движения по зданию. Результаты инерциальных измерений сопоставляются с построенным графом, и текущее положение объекта корректируется в зависимости от результатов этого сопоставления. В системах, комбинирующих инерциальные датчики с машинным зрением [25], для упрощения ориентирования по цифровой карте внутренние помещения помечаются специальными метками-ориентирами, изображения которых можно распознать и сопоставить с базой данных.

**Магнитометрия.** Для определения положения объектов внутри помещения могут применяться средства магнитометрии. Рассматриваемый метод базируется на изменении напряженности магнитного поля в зависимости от координат объекта в здании. В качестве активного маяка IPS на базе магнитометрии используются устройства, оснащенные магнитометром [2].

Различают активную и пассивную магнитометрию [29].

Пассивная магнитометрия использует для позиционирования объектов карту магнитных полей здания [1, 2, 4, 5, 29, 30–32]. Электрооборудование и металлические конструкции зданий влияют на фиксируемое значение естественного магнитного фона Земли, делая его уникальным в каждой точке здания. В IPS, основанных на пассивной магнитометрии, очень часто в качестве маяков используются мобильные устройства, имеющие встроенный магнитометр [30–33], выполняющие не только прием, но и обработку сигнала. Какой-либо дополнительной инфраструктуры, кроме подвиж-

ного приемника, пассивная магнитометрия не предусматривает.

IPS на базе пассивной магнитометрии используются в качестве алгоритма позиционирования дактилоскопическую идентификацию [1–3, 30, 31, 33, 34], алгоритм которой включает 2 этапа [3, 30, 31, 33]:

1. Предварительный этап сбора данных, на котором измеряется напряженность магнитного поля в каждой точке здания<sup>1</sup> и запись полученных измерений в базу данных (БД). Сбор данных может осуществляться как вручную, так и с использованием алгоритмов машинного обучения. В первом случае оператор обходит здание, измеряя уровень магнитного поля в различных точках здания вручную и также вручную добавляя результаты измерений в БД IPS. Во втором случае оператор также обходит здание, но выбор точек, выполнение замеров и занесение результатов измерений в БД системы осуществляется при помощи специальной программы, разработанной на базе алгоритмов машинного обучения. Этот этап является трудоемким и занимает много времени.

2. Этап позиционирования. На этом этапе подвижный приемник измеряет значение магнитного поля в конкретной точке здания, и полученные измерения сравниваются с данными, хранящимися в БД. При наличии в БД совпадений считается, что местоположение объекта обнаружено. В силу того, что точное совпадение данных из БД с результатами измерений на стороне приемника невозможно, измеренные значения подвергаются программной фильтрации, алгоритм которой от реализации IPS. В [33] для фильтрации измерений применяется метод ближайшего соседа. В [31] для обработки результатов измерений используется целый ряд алгоритмов, включающий в себя метод ближайшего соседа и фильтрацию на основе алгоритмов нейронной сети.

Для повышения точности позиционирования многие IPS используют дополнительные программные фильтры. Чаще всего это различные вариации фильтра Калмана [30, 31]. Точность пассивных магнитометрических IPS составляет в среднем 1...2 м [4]. Основным недостатком позиционирования на базе пассивной магнитометрии заключается в том, что на естественный геомагнитный фон могут влиять различные электрические приборы, проводка, металлические конструкции и пр. В связи

с этим пассивную магнитометрию часто совмещают с другими технологиями локального позиционирования [31, 32].

В [31] описана гибридная система на базе технологии Wi-Fi и пассивной магнитометрии. Поскольку технология Wi-Fi обладает низкой точностью позиционирования (3...25 м), пассивная магнитометрия здесь используется как дополнительная технология, позволяющая повысить точность. В качестве подвижного приемника в указанной системе используют мобильное устройство, оборудованное встроенным магнитометром. Для определения положения объектов система использует алгоритм дактилоскопической идентификации, часто используемый не только в пассивной магнитометрии, но и в позиционировании на базе технологии Wi-Fi. На этапе сбора данных авторы используют самообучающуюся искусственную нейронную сеть.

Пассивную магнитометрию также объединяют с инерциальной технологией [32]. В качестве приемника в представленной системе также используется мобильное устройство, помимо магнитометра имеющее встроенные инерциальные датчики (акселерометр и гироскоп). В качестве алгоритма позиционирования используется дактилоскопическая идентификация. Для повышения точности позиционирования предложено использовать метод сопоставления цифровых карт, которые могут быть загружены в систему или сгенерированы автоматически в процессе ее работы.

Позиционирование на базе пассивной магнитометрии обладает следующими преимуществами:

– для функционирования системы достаточно активного маяка [3, 29, 33]; необходимость в дополнительной инфраструктуре отсутствует;

– автономность;

– высокая защищенность IPS вследствие отсутствия дополнительной инфраструктуры. Это позволяет снизить затраты на разработку дополнительных средств с целью удовлетворения требований по информационной безопасности, предусмотренных для систем обработки и передачи данных, используемых в области здравоохранения на территории Российской Федерации;

– работоспособность при отсутствии прямой видимости между источником и приемником сигнала ввиду слабого затухания геомагнитного поля при

<sup>1</sup> В некоторых IPS предусмотрено проведение серии таких измерений.

прохождении через стены и потолочные перекрытия [34]. Это упрощает IPS и удешевляет процесс ее проектирования;

– относительное постоянство информационной базы IPS – магнитного поля Земли – в течение длительного времени.

К недостаткам пассивной магнитометрии можно отнести:

- влияние на точность позиционирования магнитных полей низкой частоты [1, 3, 5];
- низкую точность (около 1.5 м) [4, 5];
- высокую сложность технической реализации, связанную с трудоемкостью процесса сбора данных для построения магнитной карты, а также с алгоритмической сложностью вычислений, применяемых для программной фильтрации результатов измерений [5].

Активная магнитометрия использует для определения положения объектов генераторы искусственного магнитного поля [29, 34–38]. В состав такого генератора входит катушка индуктивности, при подаче тока (постоянного, переменного или импульсного) создающая вокруг себя магнитное поле определенной конфигурации (стационарное, переменное или импульсное соответственно). IPS с использованием постоянного магнитного поля в настоящее время не нашли широкого применения, поскольку эти поля невозможно отделить от магнитного поля Земли, вносящего погрешность в результаты измерений, что не позволяет провести измерения с достаточной точностью.

Принцип работы IPS на базе двух других конфигураций магнитного поля проиллюстрирован рис. 1. Генератор создает искусственное магнитное поле нужной конфигурации. Подвижный приемник оборудован магнитометром для проведения измерений. Контроллер управляет работой генератора магнитного поля. Аналого-цифровой интерфейс преобразует аналоговые сигналы от подвижного приемника в цифровые для вычисления местоположения приемника, а также вырабатывает цифровые сигналы, необходимые для функционирования контроллера. Вычислитель рассчитывает координаты текущего местоположения подвижного приемника относительно генератора магнитного поля, а также отвечает за управление IPS.

Обобщенная архитектура IPS на базе активной магнитометрии изображена на рис. 2. По периметру здания установлен ряд генераторов магнитного поля, называемых опорными станциями

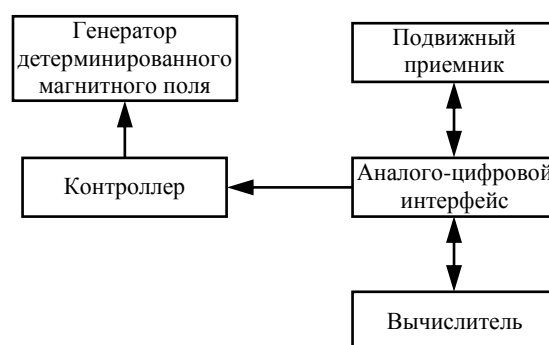


Рис. 1. Принцип работы IPS на базе генерации магнитных полей импульсной или переменной конфигурации

Fig. 1. The Operation Principle of IPS based on the Generation of Magnetic Fields with Impulse or Alternating Configuration

или якорями, координаты которых заранее известны системе. Приемник представляет собой микросхему со встроенным цифровым магнитометром. Генерируемое якорем магнитное поле вызывает индукционный ток в цепях приемника. Расстояние между подвижным приемником и опорной станцией оценивается по значению напряжения на выходе резонансного контура приемника. Положение приемника в помещении оценивается при помощи алгоритма трилатерации. Согласно этому алгоритму, для определения положения приемника в его зоне видимости должны присутствовать как минимум 3 якоря [34–38]. Далее вычисляются расстояния между приемником и якорями. Предполагается, что приемник находится на пересечении трех окружностей с радиусами, равными расстоянию от каждого из трех якорей до приемника. На основании измеренных

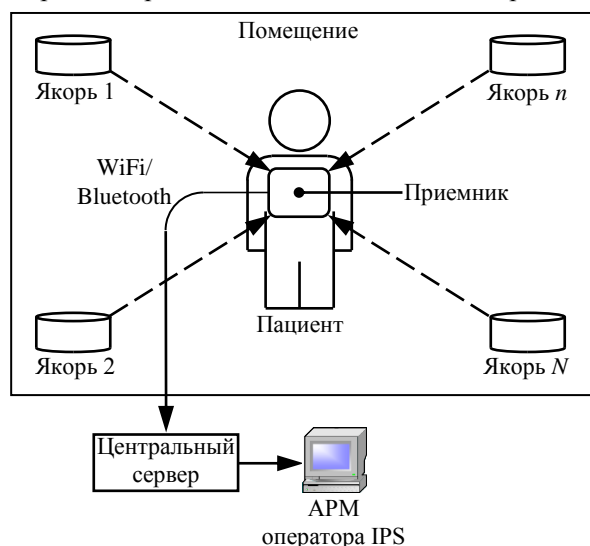


Рис. 2. Обобщенная архитектура IPS на основе активной магнитометрии

Fig. 2. Generalized Architecture of IPS based on Active Magnetometry

расстояний выполняются вычисления, результатом которых являются координаты приемника [34–38]. Положение может определяться либо непосредственно в приемнике, если он оборудован вычислительным устройством, или на центральном сервере системы. В первом случае приемник передает центральному серверу координаты своего положения, во втором – данные, полученные от опорных станций. Передача данных от подвижного приемника на центральный сервер чаще всего осуществляется по интерфейсу WiFi или Bluetooth. Центральный сервер обрабатывает данные, полученные от подвижного приемника, и передает их на автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора для их последующей визуализации.

Передача данных между опорными станциями и приемником возможна с использованием модуляции магнитного поля на стороне якорей. Схемы модуляции различаются в зависимости от конфигурации генерируемого магнитного поля. При использовании переменного магнитного поля используется временное или частотное разделение [34–36]. Каждая опорная станция генерирует магнитное поле при временном разделении в отведенный ей временной интервал, при частотном – в своем частотном диапазоне. Такой подход позволяет осуществлять передачу данных одновременно несколькими опорными станциями, что способствует достижению большей частоты измерений.

Точность позиционирования на базе переменных магнитных полей зависит от наличия в помещении и конструкциях здания токопроводящих элементов, так как эти поля наводят в них вихревые токи, влияющие на результаты измерений. Вследствие этого использование таких IPS затруднено в зданиях, имеющих железобетонные конструкции и электрическую проводку [34]. Для позиционирования в зданиях с железобетонными конструкциями наиболее применимы импульсные магнитные поля. Здесь для передачи данных используется импульсная схема модуляции, согласно которой генерируется последовательность импульсных магнитных полей различной ориентации [35, 36], что достигается изменением направления тока, поступающего на катушку индуктивности якоря. Каждая такая последовательность отделяется паузой, при которой все генераторы магнитного поля выключаются. Приемник измеряет каждый такой импульс, и на основании полученных

данных вычисляет его местонахождение. Применение импульсного магнитного поля позволяет избежать влияния вихревых токов, наводимых токопроводящими элементами, на точность позиционирования [35–38].

Частота измерений при использовании импульсных магнитных полей на порядок ниже частоты измерений в случае переменного магнитного поля. Вследствие этого местоположение движущегося объекта может определяться с задержками, что неприемлемо для систем реального времени. Даже после проведения хирургического вмешательства пациент может перемещаться по зданию клиники, поэтому любая временная задержка при работе IPS может помешать его своевременному обнаружению в случае резкого ухудшения показателей жизнедеятельности.

Для повышения точности позиционирования и уменьшения влияния электромагнитных помех в активной магнитометрии применяют дополнительные цифровые фильтры (чаще всего адаптивные) и дифференцирование магнитных сигналов. Система [35] подразделяет полученные электромагнитные сигналы на отдельные кластеры таким образом, чтобы каждый кластер включал в себя измерения, полученные в течение одного интервала между переключением направления тока на опорных станциях. Для разделения сигналов определяется взаимная корреляция между сигналом, захваченным приемником, и сигналом опорной станции. Также в целях повышения точности позиционирования в переменном магнитном поле или увеличения скорости позиционирования в импульсном магнитном поле активную магнитометрию комбинируют с другими технологиями, в частности, с инерциальной [36–38]. Для позиционирования в трехмерном пространстве некоторые системы включают в свой состав барометр, за счет которого можно определять высоту объекта слежения. Система [36] использует микросхему ADIS 16480, содержащую такие цифровые датчики, как акселерометр, гироскоп, барометр, магнетометр, датчик температуры и пр. Технические характеристики датчиков микросхемы приводятся в документации на микросхему. В дополнение к заводской калибровке датчика в режиме реального времени выполняется индивидуальная оценка погрешности измерения, что обеспечивает корректировку систематической погрешности. Наблюдения за относительным давлением воздуха позволяют определить высоту с точностью менее 0.5 м.



К достоинствам активной магнитометрии можно отнести [34–38]:

– отсутствие необходимости прямой видимости между источником и приемником сигнала из-за незначительного затухания магнитного поля при прохождении через стены и потолочные перекрытия (если перекрытие включает в себя токопроводящие элементы, то применяется позиционирование в импульсном магнитном поле);

– меньшее, по сравнению с системами пассивной магнитометрии, влияние низкочастотных магнитных полей;

– высокую точность позиционирования.

Недостатки активной магнитометрии [34–38]:

– высокая стоимость оборудования;

– высокая сложность проектирования, технической реализации и развертывания;

– малый радиус связи (до 16 м);

– низкая точность позиционирования в зданиях с конструкциями, содержащими токопроводящие элементы, при использовании переменных магнитных полей;

– невозможность позиционирования подвижных объектов в режиме реального времени при использовании импульсных магнитных полей;

– большие габариты приемника и опорных станций.

Внешний вид приемника напрямую зависит от реализации конкретной системы, так как готовых коммерческих решений для такого рода приемников не существует. Зачастую приемник представляет собой микросхему, запаянную в корпус, которая крепится на одежду или на тело объекта отслеживания. Вместе с тем существуют системы, в которых габариты приемников достаточно велики для использования в качестве постоянно носимого устройства (обычно они превышают габариты стандартного смартфона), что может доставлять дискомфорт пациенту.

Необходимо отметить, что точность позиционирования в IPS, использующих магнитометрию (как активную, так и пассивную), снижают сильные помехи, генерируемые применяемыми в медицинских учреждениях магнитно-резонансные томографы и рентгеновские установки.

**Акустическое позиционирование.** При определении местоположения объектов на базе акустических технологий используются свойства звуковых волн. Для нахождения расстояния между источником и приемником звукового сигнала применяются следующие методы [2, 6, 39–43]:

– Time of Arrival (TOA) – метод, рассчитывающий расстояние по времени прохождения акустического сигнала от источника к приемнику;

– Time Difference of Arrival (TDOA) – метод, используемый в системах с тремя и более приемниками. Расстояние до источника акустического сигнала определяется за счет разницы во времени прибытия сигнала на разные приемники [44].

Использование указанных методов требует синхронизации по времени, чтобы разные передатчики не вещали одновременно во избежание коллизий. Для определения положения объекта зачастую используют алгоритм трилатерации и мультитлатерации [2, 6, 39, 41, 45].

Акустические системы позиционирования подвержены эффекту многолучевого распространения и различным шумам, что сказывается на точности позиционирования. Для того чтобы снизить влияние шума на качество акустического сигнала, применяются дополнительные программные фильтры (например, скремблирование акустического сигнала с использованием кода псевдошума [39] или кодов Голда [41]).

IPS на базе акустики подразделяются на 2 больших класса: системы на базе слышимого звука и ультразвуковые системы [2]. IPS на базе слышимого звука используют технологию нанесения цифровых водяных знаков на уже имеющийся звук [2].

Цифровой водяной знак представляет собой особым образом закодированную последовательность аудиосигналов, несущую определенную информацию. Эта последовательность аудиосигналов накладывается на основную звуковую дорожку и не воспринимается человеческим слухом. В случае IPS в качестве цифровых водяных знаков каждый источник транслирует в окружающую среду информацию о своем местоположении.

В качестве приемника выступает микрофон (чаще всего встроенный в мобильное устройство). Поступающий на микрофон звуковой сигнал анализируется, и на основе полученных данных методом трилатерации рассчитывается положение приемника. Такого рода системы используются в общественных местах, транслирующих музыку и аудиосообщения (например, торговые и развлекательные центры). Теоретически возможно создавать IPS на базе искусственно генерируемых звуковых сигналов.

В целом определение положения пациентов в здании стационара при помощи слышимого звука

имеет много недостатков и не рекомендуется к применению. Использование цифровых водяных знаков требует усложнения системы, а сам звук (как искусственный, так и фоновый) создает шумовое загрязнение и негативно влияет на психическое и физическое здоровье человека.

Ультразвуковые IPS используют для позиционирования звуковые частоты, не воспринимаемые человеческим ухом (40...130 кГц). Радиус связи на базе ультразвука составляет от 3 до 10 м. Основным преимуществом ультразвука является тот факт, что он практически не распространяется сквозь стены и преграды, тем самым обеспечивая точность позиционирования в конкретном помещении [2, 6, 39, 42, 46].

IPS на базе ультразвука могут быть активными и пассивными [2]. В [46] описана гибридная IPS на базе ультразвука и радиочастотной технологии, способная работать в двух режимах: активном и пассивном. Активные IPS зачастую комбинируют с радиочастотной технологией, которая упрощает процесс синхронизации опорного сигнала по времени [2, 39, 41, 46]. Такие системы включают в себя стационарные приемники, именуемые якорями, и мобильный активный ультразвуковой излучатель-маяк. И якоря, и активные маяки оборудованы радиочастотными приемопередатчиками. Приемники ультразвукового сигнала фиксируются по периметру помещения, их координаты заранее известны. Активный маяк одновременно транслирует ультразвуковой и радиочастотный сигналы в окружающую среду. Скорость распространения радиочастотного сигнала значительно выше, чем акустического, поэтому он раньше достигает приемника. Измерив разницу времен между приходом радио- и ультразвукового сигналов, можно вычислить расстояние от источника до приемника [36, 41, 46]. Каждый маяк обладает собственным уникальным идентификатором, что позволяет однозначно определить объект позиционирования.

Архитектура пассивных ультразвуковых IPS включает в себя передатчики, именуемые якорями, и приемник-маяк, оснащенный микрофоном (чаще всего мобильное устройство). Якоря устанавливаются по периметру помещения, их координаты заранее известны. Приемник получает сигналы, периодически транслируемые якорями, и на основании полученных данных вычисляет свое текущее местоположение. Так как ультразвуковой сигнал отражается от стен и перекрытий, рекомендуется размещать якоря под потолком для максимально

возможного обеспечения прямой видимости между источником и приемником [40, 42–44, 46].

Необходимо отметить, что акустический канал достаточно уязвим и не может в должной мере обеспечить безопасность передачи данных. Злоумышленник легко может нарушить связь между приемником и передатчиком, транслируя звуковой сигнал на тех же частотах, на которых осуществляется передача данных. При использовании в качестве канала связи ультразвука без специального оборудования такого рода вмешательство сложно обнаружить. Также акустический канал можно прослушать, используя специальное оборудование [47].

Достоинства IPS на базе ультразвука [2, 6, 39, 41–46]:

- сигнал не воспринимается человеческим слухом;
- высокая точность позиционирования;
- возможность определить положение объекта в конкретном помещении;
- не создают помех электрическим приборам и радиоаппаратуре;
- низкая стоимость оборудования;
- простота развертывания.

Недостатки ультразвуковой технологии позиционирования [2, 6, 39, 41–47]:

- низкая защищенность канала связи;
- низкая помехоустойчивость, в том числе низкая устойчивость к помехам, вызываемым высокочастотными источниками звука (например, аппаратами УЗИ);
- высокая стоимость реализации;
- малый радиус действия связи;
- необходимость прямой видимости между приемником и источником звукового сигнала.

**Результаты.** Сравнение основных характеристик рассмотренных технологий indoor-позиционирования представлено в таблице. Характеристики оцениваются по пятибалльной шкале, где значение 1 является наихудшей оценкой, а 5 – наилучшей.

Рассмотренные технологии позиционирования обладают как достоинствами, так и недостатками. Несмотря на высокую точность инерциальных датчиков, они подвержены накоплению ошибки измерения и нуждаются в постоянной корректировке, в противном случае с течением времени точность позиционирования будет падать. Магнитометрия, как активная, так и пассивная, сложна

Сравнение характеристик рассмотренных технологий indoor-позиционирования  
Comparison of the Characteristics of the Reviewed Indoor-positioning Technologies

Оценочный критерий	Инерциальная технология	Активная магнитометрия		Пассивная магнитометрия	Акустическая технология
		Переменное поле	Импульсное поле		
Точность позиционирования	5	5	5	3	5
Радиус действия связи	Автономная	3	3	Автономная	3
Сложность развертывания	3	1	1	4	4
Энергоэффективность	5	5	5	5	5
Компактность	5	1	1	5	5
Пропускная способность канала связи	Автономная	3	1	Автономная	4
Помехоустойчивость	5	3	5	4	3
Идентификация объекта слежения	1	5	5	1	5
Защищенность канала связи	5	5	5	5	2

для реализации и к тому же подвержена влиянию помех, создаваемых медицинским оборудованием (таким, как рентгеновские установки и магнитно-резонансные томографы). Пассивная магнитометрия ориентирована скорее на навигацию пользователя внутри помещения, чем на слежение за пользователем в режиме реального времени. Для того чтобы позиционировать пациента внутри здания больницы, требуется использование дополнительной инфраструктуры, что может увеличить затраты на разработку и внедрение IPS.

Активная магнитометрия также имеет ряд недостатков. При определении местоположения объектов в переменном магнитном поле на точность позиционирования существенно влияют токопроводящие элементы, поэтому данную технологию невозможно использовать в зданиях с железобетонными конструкциями и электропроводкой. Использование импульсного магнитного поля не позволяет отслеживать подвижные объекты в режиме реального времени в связи с низкой частотой обновления измерений. При проектировании IPS на базе активной магнитометрии требуется разработка и изготовление собственного оборудования

для построения инфраструктуры, что увеличивает затраты.

IPS на базе звука акустического диапазона создают шумовое загрязнение и негативно влияют на психическое и физическое здоровье человека при длительном использовании, что недопустимо в медицинском учреждении. Позиционирование на основе ультразвука может осложняться помехами, возникающими при использовании высокочастотного медицинского оборудования (например, аппаратов УЗИ). Также к недостаткам систем на базе ультразвука можно отнести малую дальность связи, низкую помехозащищенность и слабую защищенность канала передачи данных от стороннего проникновения.

**Заключение.** На основании представленного обзора можно сделать вывод о том, что ни одна из рассмотренных технологий не может использоваться самостоятельно для indoor-позиционирования в медицинском учреждении. Тем не менее, рассмотренные технологии можно комбинировать с другими технологиями indoor-позиционирования для повышения точности и надежности разрабатываемых IPS.

#### Авторский вклад

**Черепанова Ирина Владимировна** – магнитометрия, акустическое позиционирование, список литературы, подготовка текста статьи.

**Поспелова Ирина Владимировна** – аннотация, описание инерциальной технологии, перевод на английский язык.

**Брагин Дмитрий Сергеевич** – аннотация, введение, выбор оценочных критериев, заключение.

**Серебрякова Виктория Николаевна** – введение, заключение.

#### Author's contribution

**Irina V. Cherepanova** – magnetometry, acoustical positioning, references, preparation of the paper text.

**Irina V. Pospelova** – abstract, description of an inertial technology, English translation.

**Dmitriy S. Bragin** – abstract, introduction, selection of evaluation criteria, conclusion.

**Victoria N. Serebryakova** – introduction, conclusion.

## Список литературы

1. Смольков М. С., Сухобок Ю. А. Анализ современных технологий построения систем indoor-навигации // Науч.-техн. и эконом. сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2019. Т. 2. С. 88–92.
2. Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey / R. F. Brena, J. P. García-Vázquez, C. E. Galván-Tejada, D. Muñoz-Rodríguez, C. Vargas-Rosales, J. Fangmeyer // J. of Sensors. 2017. Vol. 6. P. 1–21. doi: 10.1155/2017/2630413
3. Davidson P., Piché R. A Survey of Selected Indoor Positioning Methods for Smartphones // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 19, iss. 2. P. 1347–1370. doi: 10.1109/comst.2016.2637663
4. A Survey on Fusion-based Indoor Positioning / X. Guo, N. Ansari, Fangzi Hu, Y. Shao, N. R. Elikplim, L. Li // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 22, iss. 1. P. 566–594. doi: 10.1109/comst.2019.2951036
5. Касаткина Т. И., Чепелев М. Ю., Голев И. М. Анализ существующих технологий навигации внутри помещения // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС: сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф., Воронеж, 25 окт. 2018. Воронеж: ИПЦ "Научная книга", 2018. С. 211–213.
6. Вахрушева А. А. Технологии позиционирования в режиме реального времени // Вестн. СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2017. Т. 22, № 1. С. 170–177.
7. RealTracTechnologies. Решение для повышения эффективности и качества обслуживания пациентов медицинского центра, поликлиники или больницы. URL: <https://real-trac.com/ru/solutions/medicine/> (дата обращения 28.08.2020)
8. Situm Indoor Positioning. Indoor Location for Cozier, Safer and More Connected Hospitals. URL: <https://situm.com/en/solutions/indoor-navigation-and-employee-indoor-tracking-for-hospitals/> (дата обращения 28.08.2020)
9. InfSoft Smart Connaction Locations. Solutions for Real-Time Locating Systems. URL: <https://www.infsoft.com/use-cases/indoor-tracking-of-patients-in-hospitals> (дата обращения 28.08.2020)
10. Navigine. Healthcare. URL: <https://navigi-ne.com/industries/healthcare/> (дата обращения 28.08.2020).
11. Indoo.rs. Healthcare. URL: <https://indoo.rs/industries/healthcare/> (дата обращения 28.08.2020)
12. Оптические технологии локального позиционирования в здравоохранении (аналитический обзор) / И. В. Поспелова, Д. С. Брагин, И. В. Черепанова, В. Н. Серебрякова // Программные системы: теория и приложения. 2020. Т. 11, № 3 (46). С. 133–151. doi: 10.25209/2079-3316-2020-11-3-133-151
13. Радиочастотные технологии локального позиционирования в здравоохранении / Д. С. Брагин, И. В. Поспелова, И. В. Черепанова, В. Н. Серебрякова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 3. С. 62–79. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-62-79
14. Осипов М. П., Андреев В. С. Проблема контроля движения в задаче навигации в закрытых помещениях // Информационные технологии и нанотехнологии. 2018. С. 2505–2511.
15. Морозов А. Л., Климашин М. В., Сафин Б. Г. Определение местоположения объекта в здании на основе интегральной инерциальной системы навигации // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли АКТО-2016: сб. докл. Всерос. науч.-практ. конф. Казань: Изд-во акад. наук Респ. Татарстан, 2016. С. 608–612.
16. Ramezani M., Acharya D., Gu F., Khoshelham K. Indoor Positioning by Visual-Inertial Odometry // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. Vol. IV-2/W4. P. 371–376. doi: 10.5194/isprs-annals-iv-2-w4-371-2017
17. Ilkovičová L., Kajánek P., Kopačik A. Pedestrian Indoor Positioning and Tracking using Smartphone Sensors Step Detection and Map Matching Algorithm // Intern. Symp. on Engineering Geodesy, May 2016, Varazdin, Croatia. P. 1–24.
18. Wireless Indoor Positioning System with Inertial Sensors and Infrared Beacons / L. Januszkiewicz, J. Kaweck, R. Kaweck, P. Oleksy // 10<sup>th</sup> Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, Switzerland, Apr 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 1–3. doi: 10.1109/eucap.2016.7481650
19. A Single LED Lamp Positioning System based on CMOS Camera and Visible Light Communication / Y. Q. Ji, Ch. X. Xiao, J. Gao, J. M. Ni, H. Cheng, P. Ch. Zhang, G. Sun // Optics Communications. 2019. Vol. 443. P. 48–54. doi: 10.1016/j.optcom.2019.03.002
20. Fusion of Visible Light Indoor Positioning and Inertial Navigation based on Particle Filter / Zh. Li, A. Yang, H. Lv, L. Feng, W. Song // IEEE Photonics J. 2017. Vol. 9, iss. 5. P. 1–13. doi: 10.1109/jphot.2017.2733556
21. Single LED Beacon-Based 3-D Indoor Positioning using Off-the-shelf Devices / Y. Hou, Sh. Xiao, M. Bi, Yu. Xue, W. Pan, W. Hu // IEEE Photonics J. 2016. Vol. 8, iss. 6. P. 1–11. doi: 10.1109/JPHOT.2016.2636021
22. Кошелев Б. В., Карагин Н. А. О возможности использования смартфонов для навигации внутри помещений // Изв. Тульского гос. ун-та. Техн. науки. 2017. № 9–2. С. 131–140.
23. Han C., Zhongtao W., Longxu W. Indoor Positioning System Based on Zigbee and Inertial System // 5<sup>th</sup> Intern. Conf. on Dependable Systems and Their Applications (DSA), Dalian, China, 22–23 Sept. 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 80–85. doi: 10.1109/dsa.2018.00023
24. Inertial Sensor aided Visual Indoor Positioning / W. Fu, A. Peng, B. Tang, L. Zheng // Intern. Conf. on Electronics Technology (ICET), Chengdu, China, 23–27 May 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 106–110. doi: 10.1109/eltech.2018.8401435
25. Yilmaz A., Gupta A. Indoor Positioning using Visual and Inertial Sensors // IEEE Sensors, Orlando, USA, 30 Oct.–3 Nov. 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 1–3 p. doi: 10.1109/icsens.2016.7808526

26. Indoor Positioning System based on Inertial MEMS Sensors: Design and Realization / C. Wu, Q. Mu, Zh. Zhang, Yu. Jin, Zh. Wang, G. Shi // IEEE Intern. Conf. on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), Chengdu, China, 19–22 June 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 370–375. doi: 10.1109/cyber.2016.7574852
27. Чуйков П. Б. Определение положения объекта с использованием магнитно-инерциального метода // Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов. 2018. № 17. С. 160–166.
28. Ремпель П. В., Борисов А. П. Разработка системы позиционирования на основе беспроводной сети Wi-Fi // Электронные средства и системы управления: материалы докл. Междунар. науч.-практ. конф. / Томский ГУ систем управления и радиоэлектроники. Томск, 2018. № 1–2. С. 41–43.
29. Касаткина Т. И., Войцеховский М. А., Голев И. М. О перспективах использования систем магнитного позиционирования на объектах ФСИН России // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф., Воронеж, 25 окт. 2018 г. Воронеж: ИПЦ "Научная книга", 2018. С. 204–207.
30. Study on an Indoor Positioning System Using Earth's Magnetic Field / Sh.-Ch. Yeh, W.-H. Hsu, W.-Y. Lin, Y.-F. Wu // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 2020. Vol. 69, iss. 3. P. 865–872. doi: 10.1109/tim.2019.2905750
31. Bai Y. B., Gu T., Hu A. Integrating Wi-Fi and Magnetic Field for Fingerprinting based Indoor Positioning System // Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Alcalá de Henares, Spain, 4–7 Oct. 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 1–6. doi: 10.1109/ipin.2016.7743699
32. Binu P. K., Krishnan R. A., Kumar A. P. An Efficient Indoor Location Tracking and Navigation System using Simple Magnetic Map Matching // IEEE Intern. Conf. on Computational Intelligence and Computing Research (ICIC), Chennai, India, 15–17 Dec. 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 1–7. doi: 10.1109/icicr.2016.7919537
33. Bimal B., Hwang S., Pyun J. An Efficient Geomagnetic Indoor Positioning System Using Smartphones // The 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. on Next Generation Computing (ICNGC2017b), Taiwan, July 2018. P. 3–6.
34. An Indoor AC Magnetic Positioning System / G. De Angelis, V. Pasku, A. De Angelis, M. Dionigi, M. Mongiardo, A. Moschitta, P. Carbone // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 2014. Vol. 64, iss. 5. P. 1267–1275. doi: 10.1109/tim.2014.2381353
35. Blankenbach J., Norrdine A., Hellmers H. Adaptive Signal Processing for a Magnetic Indoor Positioning System // Proc. of the Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Guimarães, Portugal, 21–23 Sept. 2011. URL: [http://ipin2011.dsi.uminho.pt/PDFs/Shortpaper/66\\_Short\\_Paper.pdf](http://ipin2011.dsi.uminho.pt/PDFs/Shortpaper/66_Short_Paper.pdf) (дата обращения 05.11.2020)
36. A Robust Indoor Positioning System based on Encoded Magnetic Field and Low-Cost IMU / F. Wu, Yu. Liang, Yo. Fu, X. Ji // IEEE/ION Position, Location and Navigation Symp. (PLANS), Savannah, USA, Apr. 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 204–212. doi: 10.1109/plans.2016.7479703
37. An IMU/magnetometer-based Indoor Positioning System using Kalman Filtering / H. Hellmers, A. Norrdine, J. Blankenbach, A. Eichhorn // Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Montbeliard-Belfort, France, 28–31 Oct. 2013. Piscataway: IEEE, 2013. P. 1–9. doi: 10.1109/ipin.2013.6817887
38. Accurate 3D Positioning for a Mobile Platform in Non-line-of-sight Scenarios Based on IMU/magnetometer Sensor Fusion / H. Hellmers, Z. Kasmí, A. Norrdine, A. Eichhorn // Sensors. 2018. Vol. 18, iss. 1. 126 p. doi: 10.3390/s18010126
39. An Ultrasonic Indoor Positioning System for Harsh Environments / D.J. Carter, B.J. Silva, U. M. Qureshi, G. P. Hancke // IECON 2018 44<sup>th</sup> Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, Oct. 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 5215–5220. doi: 10.1109/iecon.2018.8591161
40. Osaki Sh., Naito K. Proposal of Indoor Positioning Scheme Using Ultrasonic Signal by Smartphone // Innovation in Medicine and Healthcare Systems, and Multimedia. Smart Innovation, Systems and Technologies: Proc. of KES-InMed-19 and KES-IIMSS-19 Conf. Springer, Singapore. 2019. P. 583–592. doi: 10.1007/978-981-13-8566-7\_53
41. Бурцев А. Г., Жангабулов Т. А. Сравнение различных численных методов для решения задачи ультразвукового позиционирования подвижного робота в закрытом пространстве // Инженерный вестн. Дона. 2016. Т. 41, № 2 (41). 32 с.
42. An Indoor Ultrasonic Positioning System based on TOA for Internet of Things / J. Li, G. Han, Ch. Zhu, G. Sun // Mobile Information Systems. Vol. 2016. Art. ID 4502867 10 p. doi: 10.1155/2016/4502867
43. Broadband Acoustic Local Positioning System for Mobile Devices with Multiple Access Interference Cancellation / T. Aguilera, F. Seco, F. J. Álvarez, A. Jiménez // Measurement. 2018. Vol. 116. P. 483–494. doi: 10.1016/j.measurement.2017.11.046
44. Ultrasonic Indoor Positioning for Smart Environments: A Mobile Application / E. Diaz, M. C. Perez, D. Gualda, J. M. Villadangos, J. Urena, J. J. Garcia // 4<sup>th</sup> Experiment@Intern. Conf. (exp. at'17). Faro, Portugal, Jun 2017. Piscataway: IEEE, 2017. P. 280–285. doi: 10.1109/expat.2017.7984382.
45. Mier J., Jaramillo-Alcázar A., Freire J. J. At a Glance: Indoor Positioning Systems Technologies and their Applications Areas // Intern. Conf. on Information Technology & Systems. Springer, Cham, 2019. P. 483–493. doi: 10.1007/978-3-030-11890-7\_47
46. Qi J., Liu G. P. A robust High-Accuracy Ultrasound Indoor Positioning System based on a Wireless Sensor Network // Sensors. 2017. Vol. 17, iss. 11. P. 2554. doi: 10.3390/s17112554
47. Latvala S., Sethi M., Aura T. Evaluation of Out-of-band Channels for IoT Security // SN Computer Science. 2020. Vol. 1, № 1. Art. 18. doi: 10.1007/s42979-019-0018-8

## Информация об авторах

**Черепанова Ирина Владимировна** – инженер по специальности "Радиоэлектронные системы" (2012, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники), мл. науч. сотр. лаборатории регистров сердечно-сосудистых заболеваний, высокотехнологичных вмешательств и телемедицины Научно-исследовательского института кардиологии Томского национального исследовательского медицинского центра Российской академии наук. Сфера научных интересов – связь, медицина.

Адрес: Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, ул. Киевская, д. 111а, Томск, 634012, Россия

E-mail: iv-sushkova@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6626-4979>

**Поспелова Ирина Владимировна** – инженер по специальности "Радиоэлектронные системы" (2012, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники), мл. науч. сотр. лаборатории регистров сердечно-сосудистых заболеваний, высокотехнологичных вмешательств и телемедицины Научно-исследовательского института кардиологии Томского национального исследовательского медицинского центра Российской академии наук. Автор 9 научных публикаций. Сфера научных интересов – связь, медицина.

Адрес: Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, ул. Киевская, д. 111а, Томск, 634012, Россия

E-mail: pospelova.irina88@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-4215-285X>

**Брагин Дмитрий Сергеевич** – инженер по специальности "Радиосвязь, радиовещание и телевидение" (2005, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники), мл. науч. сотр. лаборатории регистров сердечно-сосудистых заболеваний, высокотехнологичных вмешательств и телемедицины Научно-исследовательского института кардиологии Томского национального исследовательского медицинского центра Российской академии наук. Автор 6 научных публикаций. Сфера научных интересов – связь, медицина.

Адрес: Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, ул. Киевская, д. 111а, Томск, 634012, Россия

E-mail: braginds@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-0875-3301>

**Серебрякова Виктория Николаевна** – кандидат медицинских наук (2010), руководитель лаборатории регистров сердечно-сосудистых заболеваний, высокотехнологичных вмешательств и телемедицины Научно-исследовательского института кардиологии Томского национального исследовательского медицинского центра Российской академии наук. Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – медицина, кардиология.

Адрес: Научно-исследовательский институт кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, ул. Киевская, д. 111а, Томск, 634012, Россия

E-mail: vsk75@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0002-9265-708X>

## References

1. Smol'kov M. S., Sukhobok Yu. A. Analysis of current technologies of construction indoor navigation systems. *Nauchno-tehnicheskoe i jekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke*, 2019, vol. 2, pp. 88–92. (In Russ.)

2. Brena R. F., García-Vázquez J. P., Galván-Tejada C. E., Muñoz-Rodríguez D., Vargas-Rosales C., Fangmeyer J. Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey. *J. of Sensors*, 2017, vol. 6, pp. 1–21. doi: 10.1155/2017/2630413

3. Davidson P., Piché R. A survey of selected indoor positioning methods for smartphones. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, vol. 19, no 2, pp. 1347–1370. doi: 10.1109/COMST.2016.2637663

4. Guo X., Ansari N., Fangzi Hu, Shao Y., Elikplim N. R.,

Li L. A Survey on Fusion-based Indoor Positioning. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, vol. 22, iss. 1, pp. 566–594. doi: 10.1109/comst.2019.2951036

5. Kasatkina T. I., Chepelev M. Ju., Golev I. M. *Analiz sushhestvujushhij tehnologij navigacii vnutri pomeshhenija. Aktual'nye problemy dejatel'nosti podrazdelenij UIS: Sb. Materialov Vseros. nauth.-prakt. konf. Voronez: IPC "Nauthnaj kniga"*. 2018, pp. 211–213. (In Russ.)

6. Vakhrusheva A. A. Positioning technologies in real time. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tehnologij)*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 170–177. (In Russ.)

7. RealTrac Technologies. Scalable indoor positioning

and communication system for medical centers, hospitals and clinics. Available at: <https://real-trac.com/en/solutions/medicine/> (accessed 28.08.2020)

8. Situm Indoor Positioning. Indoor Location for cosier, safer and more connected hospitals. Available at: <https://situm.com/en/solutions/indoor-navigation-and-employee-indoor-tracking-for-hospitals/> (accessed 28.08.2020)

9. InfSoft Smart Connaction Locations. Solutions for Real-Time Locating Systems. Available at: <https://www.infsoft.com/use-cases/indoor-tracking-of-patients-in-hospitals> (accessed 28.08.2020)

10. Navigine. Healthcare. Available at: <https://navigine.com/industries/healthcare/> (accessed 28.08.2020).

11. Indoo.rs. Healthcare. Available at: <https://indoo.rs/industries/healthcare/> (accessed 28.08.2020)

12. Pospelova I. V., Bragin D. S., Cherepanova I. V., Serebryakova V. N. Optical technologies of local positioning in healthcare (an analytic review). Program Systems: Theory and Applications, 2020, vol. 11, no. 3 (46), pp. 133–151. doi: 10.25209/2079-3316-2020-11-3-133-151

13. Bragin D. S., Pospelova I. V., Cherepanova I. V., Serebryakova V. N. Radiofrequency Technologies of Local Positioning in Healthcare. J. of the Russian Universitets. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 62–79. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-62-79

14. Osipov M. P., Andreev V. S. The problem of monitoring of movement in the task of navigation in enclosed spaces. *Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii*, 2018, pp. 2505–2511. (In Russ.)

15. Morozov A. L., Klimashin M. V., Safin B. G. Indoor-navigation based on inertial navigation system. *Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie rossiiskoi aviakosmicheskoi otrasli-AKTO-2016*, 2016, vol. 2, pp. 608–612. (In Russ.)

16. Ramezani M., Acharya D., Gu F., Khoshelham K. Indoor positioning by visual-inertial odometry. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, vol. IV-2/W4, pp. 371–376. doi: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-371-2017

17. Ilkovičová L., Kajánek P., Kopacik A. Pedestrian Indoor Positioning and Tracking using Smartphone Sensors Step Detection and Map Matching Algorithm // Intern. Symp. on Engineering Geodesy, May 2016, Varazdin, Croatia, pp. 1–24.

18. Januszkiewicz L., Kawecki J., Kawecki R., Oleksy P. Wireless Indoor Positioning System with Inertial Sensors and Infrared Beacons. 10<sup>th</sup> Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP). Davos, Switzerland, Apr 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 1–3. doi: 10.1109/eucap.2016.7481650

19. Ji Y. Q., Xiao Ch. X., Gao J., Ni J. M., Cheng H., Zhang P. Ch., Sun G. A Single LED Lamp Positioning System Based on Cmos Camera and Visible Light Communication. *Optics Communications*, 2019, vol. 443, pp. 48–54. doi: 10.1016/j.optcom.2019.03.002

20. Li Zh., Yang A., Lv H., Feng L., Song W. Fusion of visible light indoor positioning and inertial navigation based on particle filter. *IEEE Photonics Journal*, 2017, vol. 9, no. 5, pp. 1–13. doi: 10.1109/JPHOT.2017.2733556

21. Hou Y., Xiao Sh., Bi M., Xue Yu., Pan W., Hu W. Single LED beacon-based 3-D Indoor Positioning using Off-the-shelf Devices. *IEEE Photonics Journal*, 2016, vol. 8,

no. 6, pp. 1–11. doi: 10.1109/JPHOT.2016.2636021

22. Koshelev B. V., Karagin N. A. *O vozmozhnosti ispol'zovaniya smartfonov dlja navigacii vnutri pomeshhenij. Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2017, no. 9–2, pp. 131–140. (In Russ.)

23. Han C., Zhongtao W., Longxu W. Indoor Positioning System Based on Zigbee and Inertial System. 2018 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Dependable Systems and Their Applications (DSA), Dalian, China, 22–23 Sept. 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 80–85. doi: 10.1109/dsa.2018.00023

24. Fu W., Peng A., Tang B., Zheng L. Inertial sensor aided visual indoor positioning. 2018 Int. Conf. on Electronics Technology (ICET), Chengdu, China, 23–27 May 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 106–110. doi: 10.1109/eltech.2018.8401435

25. Yilmaz A., Gupta A. Indoor positioning using visual and inertial sensors. 2016 IEEE Sensors. Orlando, USA, 30 Oct.–3 Nov. 2016. Piscataway: IEEE, 2016, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808526

26. Wu C., Mu Q., Zhang Zh., Jin Yu., Wang Zh., Shi G. Indoor positioning system based on inertial MEMS sensors: Design and realization. 2016 IEEE Intern. Conf. on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Chengdu, China, 19–22 June 2016. Piscataway: IEEE, 2016, pp. 370–375. doi: 10.1109/CYBER.2016.7574852

27. Chuikov P. B. Determination of the position of the object with the use of the magnetic-inertial method. *Tekhnika XXI veka glazami molodykh uchenykh i spetsialistov*, 2018, no. 17, pp. 160–166. (In Russ.)

28. Rempel' P. V., Borisov A. P. *Razrabotka sistemy pozicionirovaniya na osnove besprovodnoj seti WiFi. Jelektronnye sredstva i sistemy upravleniya. Materialy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Tomsk: Tomskij GU system upravlenij I radioelektroniki*, 2018, no. 1–2, pp. 41–43. (In Russ.)

29. Kasatkina T. I., Voitsekhovskii M. A., Golev I. M. *O perspektivakh ispol'zovaniya sistem magnitnogo pozicionirovaniya na ob'ektakh FSIN Rossii. Aktual'nye problemy deyatel'nosti podrazdelenii UIS: sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Voronez, 25 okt. 2018, Voronez: IPC "Nauthnaj kniga"*, 2018, pp. 204–207. (In Russ.)

30. Yeh Sh.-Ch., Hsu W.-H., Lin W.-Y., Wu Y.-F. Study on an Indoor Positioning System Using Earth's Magnetic Field. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*. 2020, vol. 69, iss. 3, pp. 865–872. doi: 10.1109/tim.2019.2905750

31. Bai Y. B., Gu T., Hu A. Integrating Wi-Fi and magnetic field for fingerprinting based indoor positioning system. 2016 Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Alcalá de Henares, Spain, 4–7 Oct. 2016. Piscataway: IEEE. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/ipin.2016.7743699

32. Binu P. K., Krishnan R. A., Kumar A. P. An efficient indoor location tracking and navigation system using simple magnetic map matching. 2016 IEEE Intern. Conf. on Computational Intelligence and Computing Research (IC-CIC). Chennai, India, 15–17 Dec. 2016. Piscataway: IEEE, 2016, pp. 1–7. doi: 10.1109/iccic.2016.7919537

33. Bimal B., Hwang S., Pyun J. An Efficient Geomag-

netic Indoor Positioning System Using Smartphones. The 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. on Next Generation Computing (IC-NGC2017b), 2018, pp. 3–6.

34. De Angelis G., Pasku V., De Angelis A., Dionigi M., Mongiardo M., Moschitta A., Carbone P. An Indoor AC Magnetic Positioning System. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*. 2014, vol. 64, iss. 5, pp. 1267–1275. doi: 10.1109/tim.2014.2381353

35. Blankenbach J., Norrdine A., Hellmers H. Adaptive Signal Processing for a Magnetic Indoor Positioning System. Proc. of the 2011 Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Guimarães, Portugal, 21–23 Sept. 2011. Available at: [http://ipin2011.dsi.uminho.pt/PDFs/Shortpaper/66\\_Short\\_Paper.pdf](http://ipin2011.dsi.uminho.pt/PDFs/Shortpaper/66_Short_Paper.pdf) (accessed 05.11.2020)

36. Wu F., Liang Yu., Fu Yo., Ji X. A Robust Indoor Positioning System based on Encoded Magnetic Field and Low-Cost IMU. 2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symp. (PLANS). Savannah, USA, Apr 2016. Piscataway: IEEE, 2016, pp. 204–212. doi: 10.1109/plans.2016.7479703

37. Hellmers H., Norrdine A., Blankenbach J., Eichhorn A. An IMU/magnetometer-based Indoor Positioning System using Kalman Filtering. Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Montbeliard-Belfort, France, 28–31 Oct. 2013. Piscataway: IEEE, 2013, pp. 1–9. doi: 10.1109/ipin.2013.6817887

38. Hellmers H., Kasmi Z., Norrdine A., Eichhorn A. Accurate 3D Positioning for a Mobile Platform in Non-line-of-sight Scenarios Based on IMU/magnetometer Sensor Fusion. *Sensors*. 2018, vol. 18, iss. 1, 126 p. doi: 10.3390/s18010126

39. Carter D. J., Silva B. J., Qureshi U. M., Hancke G. P. An Ultrasonic Indoor Positioning System for Harsh Environments. IECON 2018 44<sup>th</sup> Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. Washington, Oct. 2018. Piscataway: IEEE, 2018, pp. 5215–5220. doi: 10.1109/iecon.2018.8591161

40. Osaki Sh., Naito K. Proposal of Indoor Positioning Scheme Using Ultrasonic Signal by Smartphone. Inno-

tion in Medicine and Healthcare Systems, and Multimedia. Smart Innovation, Systems and Technologies: Proc. of KES-InMed-19 and KES-IIMSS-19 Conf. Springer, Singapore. 2019, pp. 583–592. doi: 10.1007/978-981-13-8566-7\_53

41. Burtsev A. G., Zhabgulov T. A. *Sravnienie razlichnykh chislennykh metodov dlya resheniya zadachi ul'trazvukovogo pozitsionirovaniya podvizhnogo robota v zakrytom prostranstve. Inzhenernyi vestnik Dona*, 2016, vol. 41, no. 2 (41). (In Russ.)

42. Li J., Han G., Zhu Ch., Sun G. An Indoor Ultrasonic Positioning System based on TOA for Internet of Things. *Mobile Information Systems*, vol. 2016, art. ID 4502867, 10 p. doi: 10.1155/2016/4502867

43. Aguilera T., Seco F., Álvarez F. J., Jiménez A. Broadband Acoustic Local Positioning System for Mobile Devices with Multiple Access Interference Cancellation. *Measurement*. 2018, vol. 116, pp. 483–494. doi: 10.1016/j.measurement.2017.11.046

44. Diaz E., Perez M. C., Gualda D., Villadangos J. M., Urena J., Garcia J. J. Ultrasonic Indoor Positioning for Smart Environments: A Mobile Application. 2017 4<sup>th</sup> Experiment@Intern. Conf. (exp. at'17). Faro, Portugal, Jun 2017. Piscataway: IEEE, 2017, pp. 280–285. doi: 10.1109/expat.2017.7984382

45. Mier J., Jaramillo-Alcázar A., Freire J. J. At a Glance: Indoor Positioning Systems Technologies and their Applications Areas. Intern. Conf. on Information Technology & Systems. Springer, Cham, 2019, pp. 483–493. doi: 10.1007/978-3-030-11890-7\_47

46. Qi J., Liu G. P. A robust High-Accuracy Ultrasound Indoor Positioning System based on a Wireless Sensor Network. *Sensors*. 2017, vol. 17, iss. 11, pp. 2554. doi: 10.3390/s17112554

47. Latvala S., Sethi M., Aura T. Evaluation of Out-of-band Channels for IoT Security. *SN Computer Science*. 2020, vol. 1, no. 1, art. 18. doi: 10.1007/s42979-019-0018-8

## Information about the authors

**Irina V. Cherepanova**, Engineer of Electronic systems (2012, Tomsk state university of control systems and radioelectronics). Junior Researcher Scientist of the Laboratory of registries of cardiovascular diseases, high-tech interventions and telemedicine, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences. Area of expertise: communication, medicine.

Address: Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences (Cardiology Research Institute, Tomsk NRMCM), 111a Kievskaya St., Tomsk 634012, Russia

E-mail: [iv-sushkova@mail.ru](mailto:iv-sushkova@mail.ru)

<http://orcid.org/0000-0002-6626-4979>

**Irina V. Pospelova**, Engineer of Computer Software and Automated Systems (2016, National Research Tomsk Polytechnic University), Junior Researcher Scientist of the Laboratory of registries of cardiovascular diseases, high-tech interventions and telemedicine, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences. The author of 9 scientific publications. Area of expertise: communication, medicine.

Address: Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences (Cardiology Research Institute, Tomsk NRMCM), 111a Kievskaya St., Tomsk 634012, Russia

E-mail: [pospelova.irina88@gmail.com](mailto:pospelova.irina88@gmail.com)

<http://orcid.org/0000-0002-4215-285X>



**Dmitriy S. Bragin**, Engineer of Radio, broadcasting and Television (2005, Tomsk state university of control systems and radioelectronics). Junior Researcher Scientist of the Laboratory of registries of cardiovascular diseases, high-tech interventions and telemedicine, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences. The author of 6 scientific publications. Area of expertise: communication, medicine. Address: Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences (Cardiology Research Institute, Tomsk NRMC), 111a Kievskaya St., Tomsk 634012, Russia  
E-mail: [braginds@mail.ru](mailto:braginds@mail.ru)  
<http://orcid.org/0000-0002-0875-3301>

**Victoria N. Serebryakova**, PhD (2010), Head of the Laboratory of registries of cardiovascular diseases, high-tech interventions and telemedicine, Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: medicine, cardiology. Address: Cardiology Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences (Cardiology Research Institute, Tomsk NRMC), 111a Kievskaya St., Tomsk 634012, Russia  
E-mail: [vsk75@yandex.ru](mailto:vsk75@yandex.ru)  
<http://orcid.org/0000-0002-9265-708X>

---