

УДК 616-073.65 + 616-71

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-2-464-470

МЕТОДЫ НЕИНВАЗИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА

© Л.В. Жорина

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

E-mail: larisa7777@li.ru

Актуальным является бесконтактное получение клинической информации в текущем режиме с компьютерной обработкой результатов в удобной для врача форме без вредных воздействий на организм больного. Измерение внутренней температуры тела может дать уникальную диагностическую информацию. В обзоре проведено рассмотрение и сравнение методов неинвазивного измерения внутренней температуры тела на нынешнем этапе. Описаны такие методы, как магниторезонансная (ЯМР) термометрия, СВЧ-радиотермометрия, акустотермометрия. Дана информация о принципах расчета глубинной температуры в каждом из методов. Предложено сравнение методов по пространственному, временному разрешению, точности определения температуры, стоимости аппаратуры. Приведены достоинства и недостатки методов в плане клинических приложений.

Ключевые слова: магниторезонансная (ЯМР) термометрия; СВЧ-радиотермометрия; радиотермограф; акустотермометрия; внутренняя температура

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более значимым становится бесконтактное получение информации в текущем режиме с компьютерной обработкой результатов в удобной для врача форме без вредных воздействий на организм больного. В основе многих современных диагностических процедур лежат температурные показатели состояния организма человека в норме и при патологиях, важность которых для состояния здоровья известна с древних времен. Измерение внутренней температуры тела может дать уникальную диагностическую информацию. Кроме того, в ряде случаев изменения температуры могут предшествовать морфологическим изменениям тканей, которые можно зарегистрировать с помощью рентгеновского, ультразвукового (УЗ) и других диагностических методов.

Среди традиционных методов определения внутренней температуры существенную роль играет прямое измерение температуры с помощью термодатчиков, вводимых в ткани на нужную глубину. Его недостатком является ответная реакция организма, которая искажает искомое распределение температур. Кроме того, введение термометрических щупов на практике используется редко по причине болезненности и травматичности процедуры. В связи с этим актуальной является задача разработки и экспериментальной проверки неинвазивных методов измерения распределения температуры внутри биологических объектов.

Для неинвазивного измерения внутренней температуры возможно использование методов магниторезонансной (ЯМР) термометрии, СВЧ-радиотермометрии и акустотермометрии. Во всех трех способах разработчикам необходимо решить сложнейшую задачу расчета пространственной структуры соответствующих полей и соответствующего пространственного распределения

температуры. Такие расчеты предполагают создание математических моделей, учитывающих множество факторов. От правильности построения математической модели зависит правильность и точность полученного пространственного распределения температуры.

Рассмотрим и сравним методы неинвазивного измерения внутренней температуры тела на нынешнем этапе.

МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ

Бесконтактный режим контроля внутренней температуры возможен с помощью магнитно-резонансной томографии (МРТ) (магниторезонансная (ЯМР) термометрия). Это направление развивается примерно в течение двадцати лет, но настоящие успехи в этом направлении лишь начинаются [1–5]. Зависимость от температуры имеют: время спин-решеточной релаксации, время спин-спиновой релаксации, протонная плотность (намагниченность), коэффициент диффузии и химический сдвиг [5–8]. Например, по закону Кюри магнитная восприимчивость вещества обратно пропорциональна температуре [6], а характерное время энергетического обмена спинов с решеткой линейно растет с ростом температуры [1]. В последние годы разработаны варианты применения наличия этих зависимостей в МРТ-термометрии. Достоинства и недостатки различных подходов определения температуры еще исследуются. Например, при регистрации изменения коэффициента самодиффузии в зависимости от температуры достигнута термочувствительность 0,2 К при объеме вокселя¹ 0,30 см³, а по изменению фазы МРТ сигнала

¹ Воксел – минимальный объемный элемент трехмерного компьютерного изображения, термин компьютерной графики.

точность регистрации изменения температуры составила 1,0 К при объеме воксела 0,05 см³ и временном разрешении менее 10 секунд [5].

МРТ-термометрия для медицинского применения является сложной технической задачей. В клинической практике измеряемые температуры лежат в диапазоне от 30 до 45 °С. В отличие от различий в плотности тканей изменения температуры человеческого тела недостаточны для того, чтобы оказать значимое влияние на время спин-решеточной релаксации. В упомянутом диапазоне процесс ЯМР находится в режиме энергетического насыщения, и ЯМР сигнал требует многократного усиления. Для клинической практики же требуется регистрация температурных изменений, лежащих в пределах лишь нескольких процентов абсолютной величины при разрешении до десятых долей градуса. На практике использование рассматриваемого метода осложняется колебаниями температуры в пределах нескольких градусов, обусловленных конвекцией, перфузией в кровеносных сосудах, изменением уровня насыщения крови кислородом и т. д. Эти температурные колебания во время МРТ-сканирования ведут к систематической ошибке измерений [5; 9]. Тем не менее, уже есть объявление о технологии УЗ-абляции тканей под контролем МРТ [10], при этом используются данные МРТ, описывающие пространственно-временное распределение температуры и накопленную термическую дозу, которые позволяют в ходе процедуры абляции подстраивать параметры УЗ воздействия.

Метод ЯМР-термометрии отличается от методов СВЧ радиотермометрии и акустотермометрии наилучшим пространственным разрешением. Он же имеет существенный недостаток – высокую стоимость аппаратуры и ее обслуживания.

СВЧ-РАДИОТЕРМОМЕТРИЯ

Наиболее разработанным и вышедшим в практическую медицину методом измерения внутренней температуры является метод микроволновой (СВЧ) радиотермометрии, который основан на измерении интенсивности собственного электромагнитного излучения внутренних тканей тела человека в области сверхвысоких частот (СВЧ). Интенсивность электромагнитного излучения нагретых тел описывается законом Планка. Для температуры человеческого тела 310 К (37 °С) максимум излучения приходится на длину волны инфракрасного (ИК) диапазона 9,47 мкм. В диапазоне СВЧ интенсивность излучения на 5–6 порядков меньше, чем в ИК-диапазоне, а энергия кванта много меньше энергии тепловых колебаний молекул тела. В этом случае закон Планка аппроксимируется формулой Релея–Джинса, из которой следует, что в радиодиапазоне интенсивность излучения прямо пропорциональна температуре тела. На этом факте и базируется радиотермометрия. Температура внутренних тканей этим методом может быть определена с точностью 0,2 К [11]. По сравнению с МРТ-термометрией СВЧ-радиотермометрия имеет высокую термочувствительность, но низкое пространственное разрешение [12]. С увеличением длины волны пространственная разрешающая способность ухудшается. Так, применение радиотермометрии с длиной волны 3,7 мм обеспечивает разрешающую способность в пределах 0,5 см, а 8,2 мм – 1 см [13].

Из-за малой интенсивности собственного излучения тела в СВЧ-диапазоне, а также из-за сильного отражения обратно от границы тело-воздух дистанционная регистрация излучаемых телом волн сильно затруднена. Для уверенного приема необходимы аппликаторные датчики (контактные антенны), плотно прилегающие к телу. Многочисленные области возможного применения СВЧ-радиотермометрии требуют создания различных антенн-аппликаторов и построения математических моделей для расчета тепловых полей внутри биообъекта [14].

С помощью микроволновой радиотермометрии возможно обнаружить патологический очаг на глубине от 3 до 7 см [11]. Средняя глубина измерения температуры определяется глубиной, с которой могут дойти СВЧ-волны без значительного затухания. Она зависит от длины волны и типа ткани. С увеличением длины волны увеличивается глубина радиозондирования. Оптимальными для измерения глубинной температуры являются радиотермометры, регистрирующие излучение с длиной волны λ в воздухе от 20 до 40 см. Более короткие волны сильно затухают. Для регистрации более длинных волн необходимы антенны очень большого размера, которые имеют малую пространственную разрешающую способность [13; 15]. Глубина измерения температуры зависит не только от выбранного диапазона рабочих частот радиотермометра, но и от конструкции антенны, в частности, ее диаметра и высоты [13–14; 16]. Результаты проведенного в [14] анализа различных антенн показали, что по большинству параметров волноводная антенна диаметром 38 мм, работающая в диапазоне 3,4...4,2 ГГц, превосходит все остальные антенны. Однако во многих случаях размер измеряемого органа не позволяет использовать антенны большого диаметра, и в этом случае необходимо использовать миниатюрные антенны. Анализ миниатюрных антенн-аппликаторов [16] позволил утверждать, что антенны малого диаметра имеют бесспорные преимущества при выявлении небольших по размеру температурных аномалий, расположенных на глубине 10...15 мм. Для опухолей диаметром 20 мм на глубине свыше 15 мм стандартная антенна имеет незначительное преимущество по сравнению с миниатюрной антенной.

Делаются многочисленные попытки улучшить пространственное разрешение метода с помощью уменьшения размеров области концентрации электромагнитного поля при фокусировке апертуры антенны. Количественные оценки улучшения пространственного разрешения сделаны в работе [17]. Расчеты показали, что улучшение разрешения при радиотермометрии возможно только в направлении, параллельном апертуре, локализация положения аномалии в перпендикулярном направлении невозможна. Кроме того, размеры сфокусированной области составляют 0,01...0,3 м в зависимости от вида биологической ткани, глубины расположения точки фокусировки, частоты регистрируемого радиоизлучения и размера сфокусированной апертуры [17].

Антенны радиотермометров должны иметь хорошую помехозащищенность, поскольку антенна во время измерения находится в поле действия нежелательных источников электромагнитных помех, создаваемых мобильными телефонами, компьютерами и т. д. Антенна должна без отражений принимать сигнал,

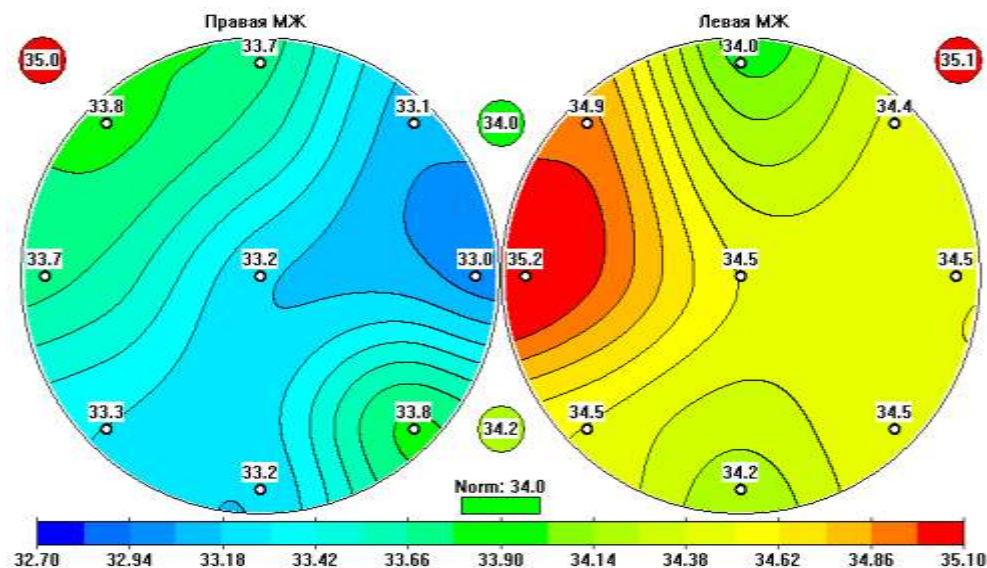


Рис. 1. Поле внутренних температур молочной железы как результат радиотермометрического обследования: выявлена опухоль в одной из желез. Шаг изотерм составляет 0,12 °C [11]

поступающий от тела, но не принимать электромагнитное излучения из окружающего пространства. Помехозащищенность антенн позволяет использовать их без экранировки помещения.

Разработка радиотермографов идет по двум направлениям: создание одноканальных СВЧ-радиотермографов с использованием одного датчика (антенны) для измерения и многоканальных СВЧ-радиотермографов, использующих для измерений одновременно несколько антенн, т. н. антенные решетки.

Методика одноканальной СВЧ-радиотермометрии заключается в поочередном измерении датчиком внутренней температуры в нескольких точках. Итог радиотермометрического обследования может быть воспроизведен на мониторе компьютера или на принтере в виде таблицы, термограммы или температурного поля на проекции обследуемого органа с линиями-изотермами и привязкой температурного поля к обследуемым точкам (рис. 1) [11; 13].

В 2008 г. в России был создан помехозащищенный радиотермограф РТМ-01-РЭС, способный работать без специальной экранировки помещения, что позволило использовать метод в практическом здравоохранении. В настоящее время РТМ-01-РЭС является единственным серийно выпускаемым, помехозащищенным радиотермографом, сертифицированным в России, ЕС и в ряде других стран. Прибор включен в стандарт медицинской помощи России и в перечень медицинских услуг, утвержденных приказом Минздрава России. Характеристики отечественного измерительного комплекса РТМ-01-РЭС приведены в табл. 1 [11]. Отметим, что измерение температуры кожи данным прибором производится с помощью инфракрасного датчика.

Активно разрабатываются и многоантенные радиотермографы. В таких системах N антенн устанавливаются по поверхности тела или головы человека, принятые сигналы одновременно по соответствующим N каналам поступают в приемник. Преимущество многоканальных систем перед одноканальными состоит в том, что получить температурную информацию можно одновременно с нескольких участков в соответствии с

Таблица 1

Характеристики измерительного комплекса РТМ-01-РЭС

Характеристика	Величина
Диапазон регистрируемых частот, ГГц	3,4...4,2
Глубина обнаружения температурной аномалии, см	3...7
Точность определения глубинной усредненной температуры, в диапазоне температур 32...38 °C, °C	±0,2
Время измерения глубинной температуры в одной точке, с	8
Диаметр антенны-аппликатора, мм	8; 15; 22; 32
Точность измерения температуры кожи, °C	±0,2
Время измерения температуры кожи при перепаде температур 32...38 °C, с	1
Масса основного комплекта, кг	4
Потребление от сети (220 В, 50/60 Гц), Вт	20

числом каналов. Ожидается, что в подобных системах будет лучше пространственное разрешение. Например, в национальном техническом университете г. Афины (Греция) [18] разработана компактная портативная система с приемником, регистрирующим мощность излучения в диапазоне $3,2 \pm 0,45$ ГГц от четырех антенн. Время измерения одной температуры такой системой составило 40 с, пространственное разрешение – 1 см, температурное разрешение менее 1 °C, при этом повышенная температура регистрируется с глубины 4,5...5 см.

Разработанный в нашей стране многоканальный радиотермограф [19] имеет 20 каналов и работает на двух частотах, чем обеспечивается измерение температур, соответствующих разной глубине. Постоянно ведется работа, направленная на улучшение его характеристик [20–22]. Предполагается использование этого

радиотермографа для визуализации тепловых изменений мозга с глубины до 1,5...2,5 см.

Главными областями практического внедрения СВЧ-радиотермометрии в настоящее время являются диагностика злокачественных опухолей различных органов (молочной железы, мозга, легких), определение положения метастазов, а также оценка функционального состояния коры головного мозга [13–14; 23]. Метод также эффективен для диагностики заболеваний щитовидной железы, воспалительных заболеваний малого таза, тазобедренного сустава, нижних конечностей, нагноения ран, возможно применение в дерматологии, флебологии, урологии, неврологии, травматологии и др. [13–14; 24].

Устойчивые температурные изменения часто предшествуют клиническим проявлениям патологического процесса и, следовательно, могут явиться фактором ранней диагностики и контроля его динамики. С помощью СВЧ-термограммы возможно обнаружить скопление раковых клеток еще до того, как опухоль сформировалась, когда она не пальпируется и не выявляется при УЗИ и маммографии, при отсутствии жалоб. Опыт применения 17,5 см радиотермометрии при нагноениях ран [13] показывает, что метод позволяет установить правильный диагноз до появления четкой клинической картины. Подчеркнем, что эффективность лечения рака и других патологических заболеваний, обнаруженных на ранней стадии, чрезвычайно высока [13].

Альтернативой методу СВЧ-радиотермометрии является физически близкий метод акустотермометрии, основанный на пассивном приеме равновесного акустического теплового излучения.

АКУСТОТЕРМОМЕТРИЯ

Акустотермометрия – метод измерения внутренней температуры тела, основанный на регистрации акустического излучения, создаваемого тепловым движением атомов и молекул среды. Суть эффекта заключается в том, что при нагревании тела меняется отражение акустического шума от внутренних структур, и эти очень слабые искажения можно соотнести с изменением температуры глубоких слоев тканей. Чем выше частота акустических волн, распространяющихся в теле человека, тем сильнее они затухают. В связи с этим с расстояния 1...10 см из глубины тела до поверхности доходят только тепловые ультразвуковые волны мегагерцового диапазона с частотами не более 0,5...10 МГц (миллиметровый и субмиллиметровый диапазон длин волн). Интенсивность таких волн прямо пропорциональна абсолютной температуре тела. После обработки сигналов получают цветные изображения, при этом всему разбросу значений температурного поля от наименьшего до наибольшего ставят в соответствие набор цветов, аналогично формированию конечного изображения в ИК- и СВЧ-термометрии. Цветовые решения значительно упрощают анализ сложных пространственных распределений температуры и усиливают восприятие величины тепловых контрастов. По сравнению с СВЧ-радиотермометрией, использование акустических волн при определении внутренней температуры позволяет реализовать лучшее пространственное разрешение (около 2 мм) при тех же глубинах диагностики (около 5 см) и чувствительности (около 0,3 К) [12; 25–28].

К достоинствам акустотермометрии относятся возможность дистанционного пассивного измерения внут-

ренней температуры тела и высокое пространственное разрешение.

В настоящее время созданы лабораторные образцы, имеющие температурную чувствительность в десятки доли градуса и позволяющие осуществлять сканирование объекта. Однако имеется ряд проблем [12]. Анализ показывает, что, с одной стороны, достижимая чувствительность акустотермометров приближается к теоретически возможной, а с другой стороны, она недостаточна, чтобы использовать их для картирования внутренней температуры. Для решения этой задачи необходимо создание многоканальных сканирующих приборов. Автор [12] предполагает, что процедура картирования будет составлять десятки минут. Однако в работе [28] показана возможность достижения среднеквадратической погрешности 1 мм в определении характерного размера нагретой области при времени измерений 20 с, что может удовлетворить требованиям диагностики.

Решение задачи осложняется также тем, что на практике требуется измерение температуры в объеме всего нескольких кубических сантиметров с использованием малого числа датчиков. Для обозначенных объемов поперечный размер нагретой области сопоставим с размером антенны приемника. При таких ограничениях задача восстановления температуры с необходимой точностью считается некорректной [29]. Несмотря на это, предлагаются различные способы и алгоритмы решения обратной задачи акустотермометрии, т. е. восстановления пространственных параметров температурного распределения и определение самой температуры [29–30]. Расчеты на основе модельных экспериментов показали, что погрешность восстановления положения в пространстве и размера области с аномальной температурой за десятисекундное время интегрирования измеряемого сигнала составила 1...3 мм, а стабильность определения эффективной температуры за то же время интегрирования составила 0,5...1,0 К.

Для поиска в биообъекте образований с отклонениями температурных показателей от нормы возможна комбинация методов акустотермометрии с радиотермометрией. Радиотермометрия имеет более высокую чувствительность, высокое быстродействие и большую область «осмотра», что делает возможным быстрое отыскание участка с аномальной температурой. С помощью акустотермометрии можно далее уточнить положение его границ [12].

ВЫВОДЫ

Подводя итоги, можно сказать следующее. Наилучшее пространственное разрешение имеет ЯМР-термометрия, далее по этому параметру идет акустотермометрия, наименьшее пространственное разрешение имеет СВЧ-термометрия. Временное разрешение ЯМР и СВЧ-термометрии в разы выше, чем для акустотермометрии. Температурную чувствительность всех трех методов можно считать одинаковой. Что касается цены аппаратуры, то стоимость МРТ-томографа составляет порядка $10^7...10^8$ руб., а стоимость СВЧ-термографа существенно меньше – $5\cdot10^5...10^6$ руб. О стоимости акустотермографа говорить пока рано.

Измерения температуры с использованием ЯМР-технологий в будущем, по-видимому, позволят получать температурное распределение во всем теле человека, однако есть определенные группы пациентов, для

которых использование МРТ запрещено. Также МРТ требует специально подготовленных помещений больших размеров. Для работы с акустотермометром не требуется специальных помещений. Использование пассивной СВЧ-термометрии часто нуждается в специально экранированном помещении, что ограничивает внедрение радиотермографов в практическую медицину. Разработка радиотермографов с помехозащищенными антеннами существенно облегчит распространение этих приборов в клинической практике. Само же радиотермометрическое оборудование занимает мало места: если в процессе обследования используется прибор с одной антенной (одним приемным каналом), оно может быть размещено вместе с компьютером на малогабаритной стойке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков А.А., Никифоров В.Н., Пирогов Ю.А., Иванов А.В., Прохоров А.С. Регистрация температурного поля методом магнитно-резонансной томографии // Медицинская физика. 2011. № 1 (49). С. 75-81.
2. Гуляев М.В., Ханов С.К., Наместникова Д.Д., Губский Л.В., Фущан Чжоу, Пирогов Ю.А., Панченко В.Я. Магнитно-резонансная термометрия головного мозга крыс методом локальной ЯМР спектроскопии // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 30.01.2017).
3. Ханов С.К. Магнитно-резонансная термометрия на основе измерений времени продольной релаксации и химического сдвига: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013.
4. Ильясов К.А. Развитие методов магнитно-резонансной томографии в исследовании самодиффузии температурных полей в живых системах: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2011.
5. Волков А.А., Каксельдыев С.К., Прохоров А.С., Пирогов Ю.А. Традиционные методы нагрева в применении к магнитно-резонансной термометрии // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/iso/jan12/12/text.html> (дата обращения: 30.01.2017).
6. Rieke V., Pauly K.B. MR Thermometry // J. Magn. Reson. Imaging. 2008. № 27 (2). P. 376-390.
7. Quesson B., de Zwart J.A., Moonen C.T.W. Magnetic Resonance Temperature Imaging for Guidance of Thermotherapy // J. Magn. Reson. Imaging. 2000. № 12. P. 525-533.
8. Hornak J.P. The Basics of MRI // The Chester F. Carlson Center for Imaging Science at Rochester Institute of Technology. URL: <http://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/> (accessed: 27.01.2017).
9. Волков А.А. Магнитно-резонансная томография тепловых эффектов в модельных средах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2012.
10. Абляция фокусированным ультразвуком под контролем МРТ // Медицинская компания. URL: http://www.medicalcompany.ru/ablyaciya_fokusirovannym_ultrazvuko (дата обращения: 30.01.2017).
11. Вайсблат А.В., Веснин С.Г., Конкин М.А., Лащенков А.В., Тихомирова Н.Н. Использование микроволновой радиотермометрии в диагностике рака молочной железы // Ассоциация микроволновой радиотермометрии. URL: <http://www.radiometry.ru/radiometry/books/upload/8/13020706.pdf> (дата обращения: 30.01.2017).
12. Мансфельд А.Д. Акустотермометрия. Состояние и перспективы // Акустический журнал. 2009. Т. 55. № 4-5. С. 546-556.
13. Колесов С.Н. Полидиапазонная пассивная локация теплового излучения человека в диагностике поражений центральной и периферической нервной системы: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. М.: Рос. АМН НИИ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко, 1993.
14. Веснин С.Г., Седанкин М.К. Сравнение микроволновых антенн-аппликаторов медицинского назначения // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 10. С. 63-74.
15. Веснин С.Г. Теоретические основы использования РТМ-метода в маммологии // Организационные, медицинские и технические аспекты клинической маммологии: материалы 5 Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. М., 2008. С. 3-6.
16. Веснин С.Г., Седанкин М.К. Разработка серии антенн-аппликаторов для неинвазивного измерения температуры тканей организма человека при различных патологиях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2012. Спец. вып. № 6. Моделирование и исследование. С. 43-61.
17. Седельников Ю.Е., Потапова О.В. Сфокусированные антенны в задачах медицинской радиотермометрии // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. Вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/1206.html> (дата обращения: 1.02.2017).
18. Oikonomou A., Karanasiou I.S., Uzunoglu N.K. Phased-array near field radiometry for brain intracranial applications // Progress In Electromagnetics Research. On-line journal. 2010. V. 109. P. 345-360. URL: <http://www.jpier.org/pier/pier.php?paper=10073004/>. DOI: 10.2528/PIER10073004. (accessed: 3.02.2017).
19. Патент № 2310876 РФ, 18.04.2006. Многоканальный радиотермограф / Е.Д. Бирюков, В.С. Верба, А.Г. Гудков, В.Ю. Леушин, В.А. Плющев, И.А. Сидоров, В.Г. Систер, Д.И. Цыганов. Б.И. 2007. № 32.
20. Бобрихин А.Ф., Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Лось В.Ф., Попов В.В., Порохов И.О., Сидоров И.А. Моделирование антенн-аппликаторов унифицированных антенных решеток для многоканальных систем радиотермокартирования // Антенны. 2014. № 2 (201). С. 17-26.
21. Вьюгинов В.Н., Гудков А.Г., Королев А.В., Леушин В.Ю., Плющев В.А., Попов В.В., Сидоров И.А. Электронный модуль многоканального СВЧ-тракта для систем радиотермокартирования // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. № 1. С. 27-34.
22. Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Бобрихин А.Ф., Лось В.Ф., Порохов И.О. Разработка функционального ряда унифицированных микроволновых антенных решеток модульного типа для многоканальных систем радиотермокартирования // Медико-технические технологии на страже здоровья: материалы науч.-техн. конф. Португалия, 21-28 сентября 2012 г. М.: Изд-во НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 167-168.
23. Синельникова О.А., Керимов Р.А., Синокова Г.Т., Поликарпова С.Б. СВЧ-радиотермометрия в диагностике и оценке неоадьювантного лечения больных раком молочной железы // Опухоли женской репродуктивной системы. 2011. № 3. С. 23-28. DOI: 10.17650/1994-4098-2011-0-3-23-28.
24. Синельникова О.А., Керимов Р.А., Синокова Г.Т. Метод СВЧ-радиотермометрии в комплексной диагностике рака молочной железы // Медицинский совет. 2013. № 5-6. С. 102-104.
25. Субочев П.В. Развитие методов пассивной акустической термометрии и акустяркостного мониторинга: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН. 2010.
26. Кромов Е.В., Рейман А.М., Субочев П.В. Учет частотной зависимости коэффициента акустического поглощения при решении задач акустяркостной термометрии // Известия вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 6. С. 478-488.26.
27. Аносов А.А., Казанский А.С., Лесс Ю.А., Шаракианэ А.С. Тепловое акустическое излучение в модельных мембранах при фазовом переходе липидов // Акустический журнал. 2007. Т. 53. № 6. С. 843-848.
28. Шаракианэ А.С. Восстановление параметров меняющегося во времени пространственного температурного распределения модельных биологических объектов методом акустотермографии: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 2014.
29. Аносов А.А. Использование априорной информации в решении динамических обратных задач акустотермометрии // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 6. URL: <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 30.01.2017).
30. Аносов А.А., Казанский А.С., Мансфельд А.Д., Шаракианэ А.С. Определение положения и размера нагретой области методом динамической акустотермографии // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 3. URL: <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 30.01.2017).

Поступила в редакцию 17 февраля 2017 г.

Жорина Лариса Валерьевна, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры БМТ-1 «Биомедицинские технические системы», e-mail: larisa7777@li.ru

UDC 616-073.65 + 616-71

DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-2-464-470

METHODS OF NONINVASIVE MEASURING OF INTERNAL TEMPERATURE OF BODY

© L.V. Zhorina

Bauman Moscow State Technical University (National Research University)

5 2-ya Baumanskaya St., Moscow, Russian Federation, 105005

E-mail: larisa7777@li.ru

Noncontact receiving of clinical information in current mode with the computer processing of the results in a convenient form for the doctor, without harmful effects on the patient's body is relevant. Measurement of internal temperature of body can give unique diagnostic information. The review gives consideration and comparison of the noninvasive measurement methods of internal body temperature at this stage. Such methods as magnetic resonance (NMR) thermometry, microwave radiometry, acoustic thermometry are described. Information about the principles of deep temperatures calculation in each of the methods is given. Comparison of the methods for spatial, temporal resolution, accuracy of temperature determination, equipment cost is proposed. The advantages and disadvantages of the methods in terms of clinical applications are given.

Key words: magnetic resonance (NMR) thermometry; microwave radiometry; radiothermograph; acoustic thermometry; internal temperature

REFERENCES

1. Volkov A.A., Nikiforov V.N., Pirogov Yu.A., Ivanov A.V., Prokhorov A.S. Registratsiya temperaturnogo polya metodom magnitno-rezonansnoy tomografii [Temperature field registration by the magnetic resonance imaging technique]. *Meditsinskaya fizika – Medical Physics*, 2011, no. 1 (49), pp. 75-81. (In Russian).
2. Gulyaev M.V., Khanov S.K., Namestnikova D.D., Gubskiy L.V., Fushan Chzhou, Pirogov Yu.A., Panchenko V.Ya. Magnitno-rezonansnaya termometriya golovnogo mozga kryz metodom lokal'noy YaMR spektroskopii [Magnetic resonance thermometry of rats brain by local NMR spectroscopy method]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*, 2013, no. 10. Available at: <http://jre.cplire.ru> (accessed 30.01.2017). (In Russian).
3. Khanov S.K. *Magnitno-rezonansnaya termometriya na osnove izmereniy vremeni prodol'noy relaksatsii i khimicheskogo sdviga. Avtoref. diss. kand. ... fiz.-mat. nauk* [Magnetic Resonance Thermometry Based on Measurement of Longitudinal Relaxation Time and Chemical Shift. Cand. phys.-math. sci. diss. abstr.]. Moscow, Moscow State University Publ., 2013. (In Russian).
4. Ilyasov K.A. *Razvitiye metodov magnitno-rezonansnoy tomografii v issledovanii samodiffuzii temperaturnykh poley v zhivykh sistemakh. Avtoref. diss. dokt. ... fiz.-mat. nauk* [Development of Magnetic Resonance Imaging Methods in the Study of Self-Diffusion of Temperature Fields in Living Systems. Dr. phys.-math. sci. diss. abstr.]. Kazan, Kazan (Volga Region) Federal University Publ., 2011. (In Russian).
5. Volkov A.A., Kakageldyev S.K., Prokhorov A.S., Pirogov Yu.A. Traditsionnye metody nagreva v primeneni k magnitno-rezonansnoy termometrii [Traditional methods of heating in MR-guiding thermometry]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*, 2012, no. 1. (In Russian). Available at: <http://jre.cplire.ru/iso/jan12/12/text.html> (accessed 30.01.2017).
6. Rieke V., Pauly K.B. MR Thermometry. *J. Magn. Reson. Imaging*, 2008, no. 27 (2), pp. 376-390.
7. Quesson B., de Zwart J.A., Moonen C.T.W. Magnetic Resonance Temperature Imaging for Guidance of Thermotherapy. *J. Magn. Reson. Imaging*, 2000, no. 12, pp. 525-533.
8. Hornak J.P. The Basics of MRI. *The Chester F. Carlson Center for Imaging Science at Rochester Institute of Technology*. Available at: <http://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/> (accessed 27.01.2017).
9. Volkov A.A. *Magnitno-rezonansnaya tomografiya teplovykh effektov v model'nykh sredakh. Avtoref. diss. kand. ... fiz.-mat. nauk* [Magnetic Resonance Imaging of Thermal Effects in Modeling Environments. Cand. phys.-math. sci. diss. abstr.]. Moscow, 2012. (In Russian).
10. Ablyatsiya fokusirovannym ul'trazvukom pod kontrolem MRT [Focused ultrasound ablation under MRI control]. *Meditsinskaya kompaniya* [Medical Company]. (In Russian). Available at: http://www.medicalcompany.ru/ablyatsiya_fokusirovannym_ul'trazvuko (accessed 30.01.2017).
11. Vaysblat A.V., Vesnin S.G., Konkin M.A., Lashchenkov A.V., Tikhomirova N.N. Ispol'zovanie mikrovolnovoy radiotermometrii v diagnostike raka molochnoy zhelezy [Using microwave radiometry in the diagnosis of breast cancer]. *Assotsiatsiya mikrovolnovoy radiotermometrii* [Association of Microwave Radiometry]. (In Russian). Available at: <http://www.radiometry.ru/radiometry/books/upload/8/13020706.pdf> (accessed 30.01.2017).
12. Mansfel'd A.D. Akustotermometriya. Sostoyaniye i perspektivy [Acoustothermometry: Current status and prospects]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustical Physics*, 2009, vol. 55, no. 4-5, pp. 546-556. (In Russian).
13. Kolesov S.N. *Polidiapazonnaya passivnaya lokatsiya teplovogo izlucheniya cheloveka v diagnostike porazheniy tsentral'noy i perifericheskoy nervnoy sistemy. Avtoref. diss. ... dokt. med. nauk* [Multiple Ranging Passive Location of the Human Thermal Radiation in the Diagnosis of the Central and Peripheral Nervous System Injuries. Dr. med. sci. diss. abstr.]. Moscow, Russian Academy of Medical Sciences Institute of Neurosurgery named after N.N. Burdenko, 1993. (In Russian).
14. Vesnin S.G., Sedankin M.K. Sravneniye mikrovolnovykh anten-applikatorov meditsinskogo naznacheniya [Comparison of the microwave medical antennas]. *Biomeditsinskaya radioelektronika – Biomedical Radioelectronics*, 2012, no. 10, pp. 63-74. (In Russian).
15. Vesnin S.G. Teoreticheskie osnovy ispol'zovaniya RTM metoda v mammologii [Theory of using the RTM method in mammology]. *Materialy 5 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Organizatsionnye, meditsinskie i tekhnicheskie aspekty klinicheskoy mammologii»* [Materials of 5th All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation "Organizational, Medical and Technical Aspects of Clinical Mammology"]. Moscow, 2008, pp. 3-6. (In Russian).

16. Vesnin S.G., Sedankin M.K. Razrabotka serii antenn-applikatorov dlya neinvazivnogo izmereniya temperatury tkaney organizma cheloveka pri razlichnykh patologiyakh [Development of a series of antennas-applicators for non-invasive measurement of human body tissue temperature at various pathologies]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Estestvennye nauki – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2012, Spec. no. 6, Simulation and research, pp. 43-61. (In Russian).
17. Sedelnikov Yu.E., Potapova O.V. Sfokusirovannye anteny v zadachakh meditsinskoj radiotermometrii [Focused antennas in problems of medical radiometry]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii – Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, no. 2. (In Russian). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/1206.html> (accessed 1.02.2017).
18. Oikonomou A., Karanasiou I.S., Uzunoglu N.K. Phased-array near field radiometry for brain intracranial applications. *Progress In Electromagnetics Research. On-line journal*, 2010, vol. 109, pp. 345-360. Available at: <http://www.jpier.org/pier/pier.php?paper=10073004/>. DOI: 10.2528/PIER10073004. (accessed 3.02.2017).
19. Biryukov E.D., Verba V.S., Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Plyushchev V.A., Sidorov I.A., Sister V.G., Tsyganov D.I. *Mnogokanal'nyy radiotermograf* [Multichannel Radiotermograf]. Patent no. 2310876 RF, 2007. (In Russian).
20. Bobrikhin A.F., Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Los V.F., Popov V.V., Porokhov I.O., Sidorov I.A. Modelirovanie antenn-applikatorov unifitsirovannykh antennnykh reshetok dlya mnogokanal'nykh sistem radiotermokartirovaniya [Modeling of antennas-applicators of the unified antenna lattices for radiothermographing multichannel systems]. *Antenny – Antennas*, 2014, no. 2 (201), pp. 17-26. (In Russian).
21. Vyuginov V.N., Gudkov A.G., Korolev A.V., Leushin V.Yu., Plyushchev V.A., Popov V.V., Sidorov I.A. Elektronnyy modul' mnogokanal'nogo SVCh-trakta dlya sistem radiotermokartirovaniya [The electronic module of the multichannel microwave circuit for radio thermographing systems]. *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy – Electromagnetic Waves and Electronic System*, 2014, no. 1, pp. 27-34. (In Russian).
22. Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Bobrikhin A.F., Los V.F., Porokhov I.O. Razrabotka funktsional'nogo ryada unifitsirovannykh mikrovolnovykh antennnykh reshetok modul'nogo tipa dlya mnogokanal'nykh sistem radiotermokartirovaniya [Development of functional series of standardized microwave antenna arrays of modular type for radiothermographing multichannel systems]. *Materiyye nauchno-tekhnicheskots konferentsii «Mediko-tekhnicheskie tekhnologii na strazhe zdorov'ya»* [Materials of Scientific-Technical Conference Medical and Engineering Technologies on the Guard of Health]. Moscow, Scientific-Research Institute of Radiotronics and Laser Technics of Bauman Moscow State Technical University Publ., 2012, pp. 167-168. (In Russian).
23. Sinelnikova O.A., Kerimov R.A., Sinyukova G.T., Polikarpova S.B. SVCh-radiotermometriya v diagnostike i otsenke neoad'yuvantnogo lecheniya bol'nykh rakom molochnoy zhelezy [Microwave radiothermometry in the diagnosis and evaluation of the neoadjuvant treatment of patients with breast cancer]. *Opukholi zhenskoy reproduktivnoy sistemy – Women Reproductive System Tumors*, 2011, no. 3, pp. 23-28. (In Russian). DOI: 10.17650/1994-4098-2011-0-3-23-28.
24. Sinelnikova O.A., Kerimov R.A., Sinyukova G.T. Metod SVCh-radiotermometrii v kompleksnoy diagnostike raka molochnoy zhelezy [Microwave radiometry method in the complex diagnosis of breast cancer]. *Meditsinskiy sovet – Medical Council*, 2013, no. 5-6, pp. 102-104. (In Russian).
25. Subochev P.V. *Razvitiye metodov passivnoy akusticheskoy termografii i akustoyarkostnogo monitoring. Avtoref. diss. kand. ... fiz.-mat. nauk* [Development of methods of passive acoustic thermography and monitoring acoustic brightness. Cand. phys.-math. sci. diss. abstr.]. Nizhny Novgorod, Institute of Applied Physics RAS, 2010. (In Russian).
26. Krotov E.V., Reyman A.M., Subochev P.V. Uchet chastotnoy zavisimosti koeffitsienta akusticheskogo pogloshcheniya pri reshenii zadach akustoyarkostnoy termometrii [Account of frequency dependence of the acoustic absorption coefficient in solving problems of acoustic-brightness thermometry]. *Izvestiya vuzov. Radiofizika – Radiophysics and Quantum Electronics*, 2006, vol. 49, no. 6, pp. 478-488. (In Russian).
27. Anosov A.A., Kazanskiy A.S., Less Yu.A., Sharakshane A.S. Teplovoe akusticheskoe izluchenie v model'nykh membranakh pri fazovom perekhode lipidov [Thermal acoustic radiation in model membranes at phase transition of lipids]. *Akusticheskii zhurnal – Acoustical Physics*, 2007, vol. 53, no. 6, pp. 843-848. (In Russian).
28. Sharakshane A.S. *Vosstanovlenie parametrov menyayushchegosya vo vremeni prostranstvennogo temperaturnogo raspredeleniya model'nykh biologicheskikh ob"ektov metodom akustotermografii. Avtoref. diss. kand. ... fiz.-mat. nauk* [Restoring of parameters of the changing in time spatial temperature distribution of model biological objects by acoustic thermography. Cand. phys.-math. sci. diss. abstr.]. Moscow, V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 2014. (In Russian).
29. Anosov A.A. Ispol'zovanie apriornoy informatsii v reshenii dinamicheskikh obratnykh zadach akustotermometrii [Usage of a priori information in dynamical inverse problems of passive acoustic thermometry]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*, 2016, no. 6. (In Russian). Available at: <http://jre.cplire.ru> (accessed 30.01.2017).
30. Anosov A.A., Kazanskiy A.S., Mansfel'd A.D., Sharakshane A.S. Opredelenie polozheniya i razmera nagretoy oblasti metodom dinamicheskoy akustotermografii [Detection of heated region's location and size by dynamical acoustical thermography]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*, 2013, no. 3. (In Russian). Available at: <http://jre.cplire.ru> (accessed 30.01.2017).

Received 17 February 2017

Zhorina Larisa Valerevna, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of “Biomedical Technical Systems” (BMT1) Department, e-mail: larisa7777@li.ru

Информация для цитирования:

Жорина Л.В. Методы неинвазивного измерения внутренней температуры тела // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 2. С. 464-470. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-2-464-470

Zhorina L.V. Methods of noninvasive measuring of internal temperature of body. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 2, pp. 464-470. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-2-464-470 (In Russian).