

Научная статья
УДК 621.396.677
<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.16>

Антенна-аппликатор для раннего выявления врождённых или приобретённых аномалий тканей головного мозга

Ю. Е. Седельников, А. Р. Садыков[✉], В. А. Скачков

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ,
Российская Федерация, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10
pro3452000@gmail.com[✉]

Аннотация. Статья посвящена разработке антенны-аппликатора для медицинской диагностики, основанной на принципе регистрации присущего тканям человеческого организма радиоизлучения на примере работы с серым веществом мозга. Проведён оценочный анализ преимуществ предложенного варианта антенны в сравнении с уже существующими. Изготовлен и проверен предложенный вариант антенны-аппликатора.

Ключевые слова: антенна-аппликатор; СВЧ-технологии; скрининг организма; внутренние ткани; головной мозг

Финансирование: договор (соглашение) № 16156гу/2020 о предоставлении гранта на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерческого использования результатов в рамках реализации инновационного проекта от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям).

Введение. Одним из перспективных технических средств медицинской диагностики является радиотермография. Метод основан на принципе регистрации собственного радиоизлучения, присущего тканям человеческого организма. Изменение их физиологических (тканевых) свойств приводит к изменению как абсолютной температуры исследуемой области, так и её электрофизических свойств, в результате чего происходит отклонение шумовой температуры от нормы. Радиотермография позволяет диагностировать изменения в тканях организма на ранней стадии, а также проводить скрининг всего организма без вреда здоровью (никакого активного излучения).

Задачи, решаемые при проведении скрининга:

1) определение уровня здоровья пациента и формирование рекомендаций по его сохранению;

2) раннее выявление врождённых или приобретённых аномалий строения, функций органов и систем организма, определение степени их влияния на жизнедеятельность, формирование рекомендаций по предотвращению развития возможного заболевания или минимизации его проявлений;

3) раннее выявление факторов риска различных заболеваний и разработка рекомендаций по предотвращению развития возможной патологии;

4) определение тактики лечения уже имеющейся патологии, снижение риска возможных осложнений, последствий и ранней смертности.

Чувствительными элементами таких систем являются датчики радиотеплового излучения, представляющие собой антенны соответствующего диапазона длин волн, устанавливаемые, как правило, на поверхности обследуемого объекта.

© Седельников Ю. Е., Садыков А. Р., Скачков В. А., 2022.

Для цитирования: Седельников Ю. Е., Садыков А. Р., Скачков В. А. Антенна-аппликатор для раннего выявления врождённых или приобретённых аномалий тканей головного мозга // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 4 (56). С. 16-23. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.16>

Выход антенн подключается к радиометру – высокочувствительному радиоприёмнику. Особенностью данного типа антенн является то, что распространение электромагнитных волн происходит в тканях организма, электрофизические свойства которых значительно отличаются от вакуума (воздуха). Эти различия обусловлены высокой диэлектрической проницаемостью ϵ и удельной проводимостью γ . Распространение радиоволн в таких средах сопровождается значительным затуханием.

Первые работы на эту тему относятся к 70–90-м годам прошлого века [1–5]. В последующие годы происходило активное развитие как инструментальной части, так и методов применения и интерпретации результатов. В настоящее время созданы серийные приборы, которые заняли своё место в медико-биологической практике [6].

Несмотря на значительный прогресс, совершенствование методов и оборудования медицинской радиотермометрии продолжается. Одной из задач является модернизация антенн-датчиков контактной радиотермометрии, в частности, путём использования принципа сфокусированной антенной решётки [7]. В этом случае в качестве элемента решётки должны применяться антенны-датчики, с одной стороны, обладающие достаточно хорошими электрическими показателями и, с другой – имеющими малые электрические размеры, необходимые для реализации сфокусированной антенной решётки [8].

Целью исследования является разработка варианта антенны-аппликатора, отвечающего перечисленным требованиям.

Антенны-датчики для контактной радиотермометрии. Основным показателем эффективности проведенного радиометрического обследования является обнаружение температурного отклонения, которое связано с возможным наличием новообразования в зондируемой области. Метод радиотермометрии позволяет измерить яркостную температуру человеческой ткани путём определения интенсивности её собственного электромагнитного

(радиотеплового) излучения. Интенсивность излучения его, т.е. принимаемого «сигнала», зависит от ряда факторов, в том числе диапазона рабочих частот, свойств среды, в которой производится измерение, пространственных размеров источника радиотепловой аномалии и глубины его расположения. Немаловажную роль играют и электрические параметры антенн-датчиков.

С принципиальной точки зрения возможность выявления глубинных радиотепловых аномалий определяется двумя факторами:

- вкладом области радиотепловой аномалии в результирующее радиотепловое излучение, «принимаемое» с использованием данного датчика, который, очевидно, должен быть максимально возможным;
- минимальным по возможности вкладом радиоизлучения соседних участков;
- минимальным по возможности вкладом радиоизлучения приповерхностных участков объекта (кожный и волосяной покров, подкожный жировой слой).

В определённой мере эти требования могут обеспечиваться надлежащим выбором типа и параметров антенн-датчиков. В ряде работ [9, 10] предложены практические варианты антенн, в той или иной мере отвечающих предъявляемым требованиям. Поскольку приповерхностный слой тканей соответствует зоне ближнего (реактивного) поля антенны, некоторые авторы полагают предпочтительным применение антенн-датчиков магнитного типа.

Этот вывод основан на том, что в ближней зоне вблизи элементарного излучателя магнитного типа отсутствует радиальная составляющая электрического поля и поэтому удельное поглощение $\gamma|E|^2$ при равной излучаемой мощности должно быть меньше, чем у источника электрического типа. Однако практическая реализация антенн-датчиков магнитного типа затруднительна, поэтому среди существующих (известных) вариантов, по-видимому, наилучшие показатели со-

ответствуют антеннам, сочетающим свойства излучателей электрического и магнитного типов. Это варианты на основе открытого конца волновода и широкополосного вибратора с плечами секторного типа [9, 10]. Несмотря на хорошие электрические показатели, эти антенны имеют ряд недостатков. К их числу можно отнести не всегда приемлемые габариты, а у вибраторных антенн – ещё и способность к приёму внешних электромагнитных излучений со стороны, противоположной расположению обследуемого объекта.

Нами предложен вариант антенны, свободный от упомянутых выше недостатков¹.

Малогабаритная антенна-датчик. Предложенная авторами антенна является видоизменением известной конструкции² [9].

Аналог представляет собой закороченный отрезок волновода с размерами, большими значения критической длины волны. С противоположного конца, контактирующего с поверхностью объекта, выполняется щель, либо волновод оставляют открытым. Возбуждение щели либо возбуждение волны в отрезке волновода осуществляется традиционным способом. В целях уменьшения габаритных размеров антенны волновод может заполняться диэлектриком с малыми потерями. В первом приближении можно считать, что результирующая входная проводимость антенны складывается из собственной проводимо-

сти щели $Y_{щел}$ и шунтирующего короткозамкнутого отрезка волновода $Y_{волн}$. Поэтому отрезок волновода должен иметь длину порядка четверти длины волны в волноводе. Это обстоятельство не только влечёт увеличение габаритов антенны-датчика, но и негативно влияет на диапазонные свойства антенны ввиду выраженной частотной зависимости $Y_{волн} = Y_{волн}(f)$.

В предложенном варианте [11] построения антенны поперечные размеры отрезка волновода выбираются из условия отсутствия распространения в нём волны основного типа. В этом случае входная проводимость отрезка волновода длиной порядка одной десятой доли длины волны (или более) практически не зависит от частоты, что положительно влияет на диапазонные свойства антенн по согласованию. Кроме того, очевидно, сокращаются габаритные размеры антенны, что существенно для реализации более сложных антенных систем, например, выполняемых по принципу сфокусированной апертуры.

Предложенная антенна показана на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид антенны-аппликатора для измерения температуры внутренних тканей биологического объекта

Fig. 1. External view of the antenna-applicator for measuring internal tissue temperature of a biological object

Антенна-аппликатор работает следующим образом. Антенна-аппликатор устанавливается на теле пациента. Выход антенного аппликатора подключён к входу радиотермометра (на рис. 1 не показан), который измеряет интенсивность излучения биологического объекта.

¹ Патент № 2744537 С1 Российская Федерация, МПК А61В 5/01. Антенна-аппликатор для измерения температуры внутренних тканей биологического объекта: № 2020109529: заявл. 03.03.2020; опубл. 11.03.2021 / Ю. Е. Седельников, В. А. Скачков, А. Р. Садыков; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ». – EDN SXAHAI.

² Седанкин М. К. Антенны-аппликаторы для радиотермометрического исследования тепловых полей внутренних тканей биологического объекта: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Э. Баумана, 2013. 247 с.

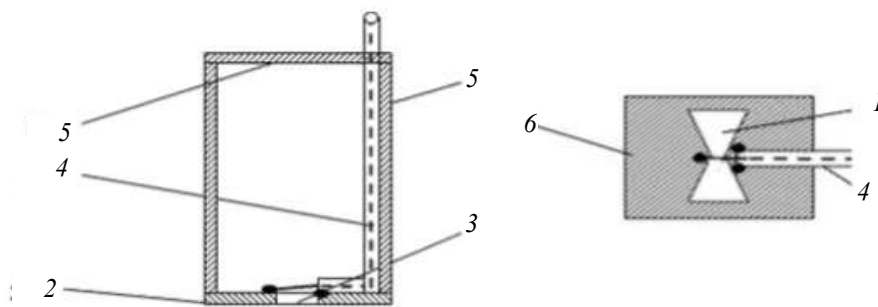


Рис. 2. Схема антенны-аппликатора для измерения температуры внутренних тканей биологического объекта

Fig. 2. Schematic of the antenna-applicator for measuring internal tissue temperature of a biological object

Электромагнитная энергия от биологического объекта поступает в щель 1, 3 (рис. 2), расположенную на стенке 6. Затем электромагнитная энергия поступает в систему возбуждения в виде коаксиального кабеля 4 и подаётся на вход приёмной системы радиотермометра для регистрации и измерения интенсивности. Приём внешнего излучения волноводом со стороны 5, противоположной торцевой стенке 2 с прорезью 3, отсутствует, так как волновод имеет размеры поперечного сечения меньше критических значений.

Результаты моделирования. Предварительные результаты, полученные на основе физического представления либо упрощенных моделей, не дают полной картины поведения предлагаемой антенны.

Поэтому для рассмотрения реального представления напряжённости электрического поля на расстояниях, близких к апертуре, необходимо воспользоваться электродинамическим моделированием с использованием программных продуктов, реализующих численные методы вычис-

лительной электродинамики, таких как CST Studio, HFSS и др. В рамках работы в качестве такого продукта был выбран CST, который представляет собой набор инструментов для проектирования, моделирования и оптимизации трёхмерных электромагнитных систем, используемых самыми передовыми технологическими инженерными компаниями по всему миру.

В качестве зондируемого участка выбран объём, заполненный материалом с параметрами серого вещества мозга, для частоты исследования 700 МГц ($\epsilon = 53$, $\sigma = 0,66$ См/м). Частота моделирования принята равной от 500 до 1000 МГц.

На рис. 1 показана расчётная модель антенны, выполненная в среде электродинамического моделирования. Диаметр антенны 38 мм, высота 33 мм.

По результатам моделирования, на частоте 600 МГц коэффициент отражения ниже -11 дБ.

Макетный образец. На рис. 3 показан макет, выполненный из двух частей (основной резонатор (1) и крышка (2)).

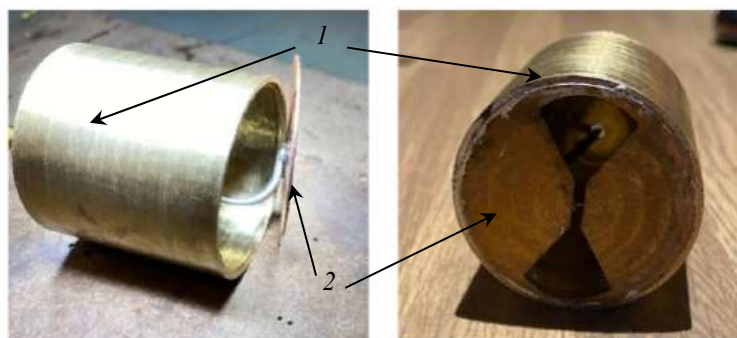


Рис. 3. Внешний вид макета

Fig. 3. Physical layout of the antenna-applicator

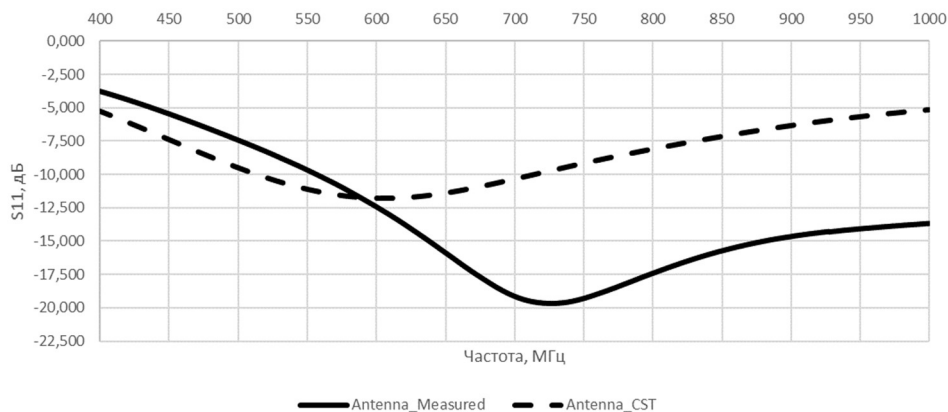


Рис. 4. S-параметры антенны-аппликатора
Fig. 4. S-parameters of the antenna-applicator

Основная часть изготовлена из латуни, крышка – из меди. Коаксиальный кабель припаивался к крышке (аналогично электродинамической модели) с помощью высокотемпературного припоя; крышка, в свою очередь, паялась к резонатору с помощью низкотемпературного припоя (такая последовательность обусловлена удобством технологического процесса).

Для снятия S-параметров антенны использовался рефлектометр CABAN R60, который предназначен для измерения комплексного коэффициента отражения в различных коаксиальных трактах в диапазоне рабочих частот от 1 до 6000 МГц.

На рис. 4 показаны результаты измерений и сравнение полученных результатов с результатами электродинамического моделирования.

Результаты электродинамического моделирования и данные эксперимента находятся в удовлетворительном совпадении (характеристика смещена на 150 МГц вправо). Некоторые различия, по-видимому, объясняются погрешностями изготовления

макетного образца, а также неучтённым влиянием конструктивного слоя диэлектрика. Полученные различия между результатами электродинамического моделирования и эксперимента не критичны, так как данный этап исследования носит оценочный характер. В качестве диэлектрической среды, к которой прикладывался макетный образец, использовалась тыльная сторона ладони одного из авторов.

Заключение. Предложен новый вариант построения антенны-датчика для задач контактной радиотермометрии. Его основным достоинством являются уменьшенные габариты. Работоспособность указанного варианта антенны подтверждена данными электродинамического моделирования и эксперимента.

Результаты проведённых исследований имеют оценочный характер и должны уточняться путём использования строгих моделей, в том числе учитывающих многослойную структуру реальных объектов радиометрической контактной диагностики.

Список литературы

1. Barrett A. H., Myers P. C. Subcutaneous temperatures: a method of noninvasive sensing // Science. 1975. Vol. 190, No. 4215. Pp. 669-671.
2. Троицкий В.С. К теории контактных радиометрических измерений внутренней температуры тел // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1981. Т. 24, № 9. С. 1054-1061
3. О возможности использования собственного теплового СВЧ радиоизлучения тела челове-

ка для измерения температуры его внутренних органов / В. С. Троицкий, И. Ф. Белов, В. П. Горбачев и др. // Успехи физических наук. 1981. Т. 134. С. 155-158.

4. Гуляев Ю.В., Годик Э.Э. Физические поля биологических объектов // Вестник АН СССР. Серия физическая. 1983. № 8. С. 118-125.

5. Веснин С.Г. Микроволновая радиотермометрия // Национальное достояние России. URL:

<http://www.medbuisness.ru/178.php> (дата обращения: 25.09.2022).

6. Вайсблат А.В. Медицинский радиотермометр РТМ-01-РЭС // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2001. № 8. С. 3-9.

7. Сфокусированные антенны в задачах контактной радиотермометрии / Ю. Е. Седельников, О. В. Потапова, А. Р. Садыков и др. // Журнал радиоэлектроники [Электронный журнал]. 2021 № 3. URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.11> (дата обращения: 25.09.2022).

8. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля. Основы теории и технические предложения / под ред Ю.Е. Седельникова и Н.А. Тестоедова. Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2015. 308 с.

9. Веснин С.Г., Седанкин М.К. Разработка серии антенн-аппликаторов для неинвазивного из-

мерения температуры тканей организма человека при различных патологиях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки 2012. Спец. вып. № 6. С. 43-61.

10. Antenna for contact microwave radiometers for monitoring of the brain microwave radiation / B. A. Panchenko, V. S. Kublanov, S. A. Baranov et al. // 2017 International Applied Computational Electromagnetic Society Symposium. Italy: ACES, 2017. Pp. 118-121. doi:10.23919/ROPACES.2017.7916406

11. Sedelnikov Y. E., Sadykov A.R. Skachkov V. A. Antenna-applicator for Non-invasive Detection of Internal Tissues Anomalies of Biological Objects // 2021 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC). Saint Petersburg, Russian Federation, 2021. Pp. 19-22. doi:10.1109/adminc54110.2021.9670903

Статья поступила в редакцию 21.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022

Информация об авторах

СЕДЕЛЬНИКОВ Юрий Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – электромагнитная совместимость радиоэлектронных систем, антенны. Автор 200 научных публикаций.

САДЫКОВ Аделя Рустемович – аспирант, ассистент кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – СВЧ-термия, скрининг организма, внутренние ткани, исследование головного мозга, малогабаритные невыступающие слабонаправленные антенны. Автор 20 научных публикаций.

СКАЧКОВ Владимир Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – малогабаритные невыступающие слабонаправленные антенны, крупногабаритные антенны космического базирования тепловое излучение биологических объектов, малоэлементные многолучевые и сканирующие антенны. Автор 100 научных публикаций.

Вклад авторов:

Седельников Ю.Е. – постановка проблемы, разработка концепции работы, критический анализ литературы.

Садыков А. Р. – разработка и программная реализация алгоритмов, сбор и анализ данных, сбор экспериментальных данных.

Скачков В. А. – описание результатов и формирование выводов работы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article
UDC 621.396.677
<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.16>

Antenna-Applicator for Early Detection of Congenital or Acquired Brain Tissue Injuries

Yu. E. Sedelnikov, A. R. Sadykov[✉], V. A. Skachkov

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,
10, K.Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation
pro3452000@gmail.com[✉]

Keywords: antenna-applicator; microwave technology; body screening; internal tissues; brain

ABSTRACT

Introduction. Radiothermography is a promising diagnostic tool in medicine. It operates based on the principle of detecting radio emissions from human body tissues. Changes in their physiological properties result in alterations of both the absolute temperature and electrophysical properties of the screening area, which can cause deviation from the normal noise temperature. These changes are captured by radiothermography. The method enables a non-invasive and safe screening of the entire body, as it does not utilize active radiation. The tasks that it solves are highly relevant and crucial, as early diagnosis of the body enables the formulation of recommendations for maintaining patient health, detecting congenital or acquired injuries in the structure and function of organs and systems, determining the degree of their impact on the patient's life, and developing recommendations for preventing progression of a possible disease or minimizing its consequences. The **objective** of this research is to design and develop an antenna-applicator that meets specific requirements. The proposed **approach** in the development of this antenna-sensor is novel compared to existing alternatives and has the benefit of reducing the form factor of the sensor while increasing its sensitivity in radiothermography. The smaller size of the sensor opens up the possibility of using antenna arrays, which can enhance the product's resolution. The measurement of human radiation in the microwave range enables detection of temperature anomalies to a depth of several centimeters. **The practical significance.** The authors have developed the antenna-sensor, which boasts reduced dimensions as its main advantage. The performance of this version of the antenna has been confirmed through electrodynamic modeling and experimental results.

Funding: Agreement No. 16156gu/2020 has been established for the purpose of issuing a grant for conducting research and evaluating the commercial potential of the research findings. This agreement is part of the Innovation Promotion Fund initiative, which supports small-scale enterprises in the scientific and technical sphere.

REFERENCES

1. Barrett A. H., Myers P. C. Subcutaneous temperatures: a method of noninvasive sensing. *Science*. 1975. Vol. 190, No. 4215. Pp. 669-671.
2. Troitskiy V.S. K teorii kontaktnykh radiometricheskikh izmereniy vnutrenney temperatury tela [To the Theory of Contact Radiometric Measurements of the Internal Temperature of Bodies]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radiofizika* [Proceedings of Higher Education Institutions. Radiophysics]. 1981. Vol. 24. No. 9. Pp. 1054-1061. (In Russ.).
3. Troitskiy V. S., Belov I. F., Gorbachev V. P. et al. O vozmozhnosti ispol'zovaniya sobstvennogo teplovogo SVCh radioizlucheniya tela cheloveka dlya izmereniya temperatury ego vnutrennikh organov [On the Possibility of Using the Human Body's Own Thermal Microwave Radio Emission to Measure the Temperature of its Internal Organs]. *Uspehi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences]. 1981. Vol. 134. Pp. 155-158. (In Russ.).
4. Gulyaev Yu.V., Godik E.E. Fizicheskie polya biologicheskikh ob"ektov [Physical Fields of Biological Objects]. *Vestnik AN SSSR. Seriya fizicheskaya* [Vestnik of the USSR Academy of Sciences. Physical Series.] 1983. No. 8. Pp. 118-125. (In Russ.).
5. Vesnin S.G. Mikrovolnovaya radiotermometriya [Microwave Radio-Thermometry]. *Natsionalnoe dostoyanie Rossii* [National Treasure of Russia]. URL: <http://www.medbusiness.ru/178.php> (reference date: 25.09.2022). (In Russ.).
6. Vaysblat A.V. Meditsinskiy radiotermometr RTM-01-RES [Medical radiothermometer RTM-01-RES].

RES]. *Biomeditsinskie tekhnologii i radioelektronika* [Biomedical technologies and radioelectronics]. 2001. No. 8. Pp. 3-9. (In Russ.).

7. Sedelnikov Yu. E., Potapova O.V., Sadykov A.R., Skachkov V.A. Sfokusirovannye anteny v zadachah kontaktnoj radiotermometrii [Focused Antennas in Contact Radiothermometry Applications]. *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics]. 2021. No. 3. doi: 10.30898/1684-1719.2021.3.11 (In Russ.).

8. Sedelnikov Yu. E. Anteny, sfokusirovannye v zone blizhnego izluchennogo polya. Osnovy teorii i tekhnichesknie predlozheniya. Pod red Yu.E. Sedelnikova i N.A. Testoyedova [Antennas focused in the near-radiated field zone. Fundamentals of theory and technical proposals. Edited by Yu.E. Sedelnikov and N.A. Testoyedov] Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University, 2015. 308 p. (In Russ.).

9. Vesnin S.G., Sedankin M.K. Razrabotka serii antenn-applikatorov dlja neinvazivnogo izmereniya temperatury tkanej organizma cheloveka pri

razlichnyh patologiyah [Development of an Antenna-Applicator Series for Tissue Temperature Non-Invasive Measurement of a Human Body at Different Pathologies]. *Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser.: «Estestvennye nauki 2012»* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences]. 2012. No. 11. Pp. 43-61. (In Russ.).

10. Panchenko B. A., Kublanov V. S., Baranov S. A. et al. Antenna for contact microwave radiometers for monitoring of the brain microwave radiation. *2017 International Applied Computational Electromagnetic Society Symposium*. Italy: ACES. 2017. Pp. 118-121. doi:10.23919/ROPACES.2017.7916406

11. Sedelnikov Y. E., Sadykov A. R., Skachkov V. A. Antenna-applicator for Non-invasive Detection of Internal Tissues Anomalies of Biological Objects. *2021 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC)*. Saint Petersburg, Russian Federation, 2021. Pp. 19-22. doi:10.1109/adminc54110.2021.9670903

The article was submitted 21.10.2022; approved after reviewing 30.11.2022; accepted for publication 15.12.2022

For citation: Sedelnikov Yu. E., Sadykov A. R., Skachkov V. A. Antenna-Applicator for Early Detection of Congenital or Acquired Brain Tissue Injuries. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2022. No 4 (56). Pp. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.16>

Information about the authors

Yury E. Sedelnikov – Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Radio-Photonics and Microwave Technologies at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI. Research interests – expertise encompasses electromagnetic compatibility of radio-electronic systems and antennas. The author of 200 scientific publications.

Adel R. Sadikov – postgraduate student and assistant at the Department of Radio-Electronic and Telecommunication Systems at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI. Research interests – microwave therapy, body screening, and internal tissue and brain research. The author of 20 scientific publications.

Vladimir A. Skachkov – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Radio-Electronic and Telecommunication Systems at Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – small-sized non-protruding low-directional antennas, large-sized space-based antennas, thermal radiation of biological objects, low-element multibeam and scanning antennas. The author of 100 scientific publications.

Contribution of authors:

Sedelnikov Yu. E. – Defined the problem, developed the conceptual framework, and conducted a critical review of the literature.

Sadykov A. R. – Developed and implemented algorithms, collected and analyzed data, and performed experiments.

Authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.