

7. *Fridman G., Friedman A., Gutsol A., Shekhter B., Vasilets V., Fridman G.* Review: Applied Plasma Medicine // Plasma Process and Polymers. 2008. Vol. 5. PP. 503-533.
8. *Dobrynin D., Fridman G., Fridman A., Friedman G.* Physical and Biological Mechanisms of Direct Plasma Interaction with Living Tissue // New Journal of Physics. 2009. Vol. 11.
9. *Gudkov S., Grinberg M., Sukhov V., Vodeneev V.* Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants // J. Env. Radioact. 2019. Vol. 202. PP. 8-24.
10. *Rogov V., Filipchuk V.* Electrochemical technology of water properties change. – Lviv: Publishing House of LSU, 1989. 82 p.
11. *Van Hemmen J., Meuling W.J.* Inactivation of biologically active DNA by  $\gamma$ -ray-induced superoxide radicals and their dismutation products singlet molecular oxygen and hydrogen peroxide // Biochimica et Biophysica Acta. 1975. Vol. 402. № 2. PP. 133-141.
12. *Baburin N., Belov S., Danyleiko Y., Egorov A., Lebedeva T., Nefedov S., Osiko V., Salyuk V.* Heterogeneous recombination in water vapor plasma // Reports of Academy of Sciences. 2009. Vol. 426. № 4. PP. 468-470.
13. *Belov S., Danyleiko Yu., Nefedov S., Osiko V., Salyuk V., Sidorov V.* Specific Features of Generation of Low-Temperature Plasma in High-Frequency Plasma Electrosurgical Apparatuses // Biomedical Engineering. 2011. Vol. 5. № 2. PP. 59-63.
14. *Belov S., Danyleiko Yu., Osiko V., Egorov A., Salyuk V.* A Device for Activation of Tissue Cell Proliferation by Dosed Exposure to RadioFrequency Currents // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 52. № 2. PP. 80-83.

Мухсинджан Хурамович Ашууров,  
 д-р физ.-мат. наук, профессор,  
 академик АН Республики Узбекистан,  
 генеральный директор,  
 ГНПП «Фонон»,  
 г. Ташкент, Республика Узбекистан,  
 Сергей Владимирович Белов,  
 д-р техн. наук, вед. научный сотрудник,  
 Институт общей физики  
 им. А.М. Прохорова РАН,  
 Сергей Владимирович Гудков,  
 д-р биолог. наук, вед. научный сотрудник,  
 ИЦВИ ИОФ РАН,  
 Юрий Константинович Данилейко,  
 д-р физ.-мат. наук, профессор,  
 зав. лабораторией,  
 Алексей Борисович Егоров,  
 научный сотрудник,  
 Валерий Васильевич Савранский,  
 канд. физ.-мат. наук, руководитель лаборатории,  
 Институт общей физики  
 им. А.М. Прохорова РАН,  
 Андрей Александрович Темнов,  
 д-р мед. наук, руководитель лаборатории  
 клеточных и физико-химических  
 медицинских технологий,  
 НИИ скорой помощи  
 им. Н.В. Склифосовского,  
 г. Москва,  
 e-mail: ser79841825@yandex.ru

А.Г. Гудков, В.Ю. Леушин, С.Г. Веснин, И.А. Сидоров, М.К. Седанкин,  
 Ю.В. Соловьев, С.В. Агасиева, С.В. Чижиков, Д.А. Горбачев, С.И. Видякин

## Исследования СВЧ-радиотермографа на основе интегральных микросхем

### Аннотация

Микроволновая радиотермометрия позволяет неинвазивно выявлять термонеоднородности в биологических тканях, проводить раннюю диагностику онкологических заболеваний, а также корректировать терапию по изменению параметров электромагнитного излучения организма. В работе представлен аналитический обзор разработок в области медицинских радиотермографов. Сформулированы проблемы, препятствующие развитию радиотермометрии, а также предложены пути их решения.

### Введение

Исследования, посвященные ранней диагностике онкологических заболеваний, в последнее время приобретают большой научный интерес. Минимальный размер опухоли, диагностируемый с применением методов ядерной медицины, составляет 15 мм в диаметре. Невозможность раннего обнаружения является основной причиной неудач в лечении опухолей, которые начинают метастазировать при меньших размерах. Поэтому актуальной задачей является поиск чувствительных методов и инструментов, позволяющих диагностировать опухоли минимальных размеров. Это важно для диагностики опухолей на ранних стадиях. К таким методам относится микроволновая радиотермометрия (МР).

Для сравнительно недорогой и оперативной диагностики может быть использована микроволновая радиотермометрия (далее – МР). В последнее время появилось много новых результатов по использованию МР в медицине. В маммологии МР применяется для диагностики и мониторинга лечения различных заболеваний молочных желез [1], [2]. МР используется для обследования головного мозга и оценки риска развития инсульта [3]-[10]. Интересные результаты получены в других

областях медицины [10]-[13]. Данные исследования выполнены одноканальным радиотермометром, который описан в [14].

Дальнейшее развитие МР затрудняется наличием ряда научно-технологических ограничений. Применяемые в медицине приборы являются одноканальными и одночастотными, а также обладают значительными размерами. Необходимы многоканальные системы, которые позволили бы в реальном масштабе времени оценивать изменение температуры по глубине и обследовать значительные зоны организма. Кроме того, это позволит осуществлять долговременный мониторинг температуры внутренних тканей. Механическое наращивание числа каналов нетехнологично, и нужно использовать новые схемы построения радиотермометров, позволяющие радикально сократить их размеры. Для этого необходимо объединение в одном измерительном комплексе принципов многоканальности, многочастотности и миниатюризации без снижения необходимых функциональных характеристик. Очевидно, использование монолитных интегральных микросхем позволяет существенно сократить размеры прибора и его составных частей [15]-[17]. В целом, для развития МР необходима разработка специальных конструкций антенн и их оптимального расположения в антенной решетке, оптимальный выбор количества

каналов и рабочих частот, а также введение дополнительной фильтрации принимаемых сигналов. При использовании радиотермографа для обследования тела человека не только чрезкожно, но и через естественные полости потребуется разработка специальных форм медицинских антенн и устройства в целом.

Сформулированную выше научную проблему можно представить в виде двух составляющих: первой научной проблемой является поиск метода, позволяющего диагностировать заболевания, в том числе онкологические, на ранних стадиях; второй научной проблемой в данном проекте является разработка неинвазивного способа мониторинга и оценки процесса развития опухолей.

### **Современные устройства, применяемые в радиотермометрии**

Исследование характеристик электромагнитных полей позволяет получить информацию об объекте, в частности о состоянии глубинных структур излучающих тел. В соответствии с законом Рэлея-Джинса плотность энергии теплового излучения биологических тканей в микроволновом диапазоне пропорциональна абсолютной температуре. Поэтому измеряя интенсивность микроволнового излучения тела, можно определить его температуру. Микроволновые радиотермометры могут быть созданы на основе различных принципов структурных схем. Два наиболее распространенных варианта: радиотермометр полной мощности и радиотермометр, построенный на основе схемы R.H. Dicke. Большинство радиотермометров, представленных в публикациях, построено на базе данных схем или их модификациях. В настоящее время исследования в области МР идут в различных направлениях. Среди основных направлений можно выделить создание различных радиотермографов (одноканальных, многоканальных, одночастотных, многочастотных и их комбинаций), а также решение задач, связанных с медицинской апробацией и внедрением созданных изделий. Помимо одноканального радиотермометра [14], известно несколько одноканальных микроволновых радиотермометров, описанных в [18]-[21].

В работе [18] описан оригинальный радиотермометр, который, в отличие от традиционного Dicke-радиотермометра, измеряет не только температуру внутренних тканей, но также позволяет измерить коэффициент отражения антенны, а значит компенсировать существующие отражения от антенны. Структурная схема прибора имеет некоторые особенности по сравнению с радиотермометром [14]. В работе [19] для мониторинга температуры внутренних тканей применяли одноканальный радиотермометр, работающий на частоте 1,35 ГГц, с полосой пропускания 500 МГц. В качестве радиотермометра использовался модифицированный радиотермометр полной мощности с двумя референсными источниками. Радиотермометр состоит из двух блоков. Первый блок включает в себя переключатель, два референсных источника шума и первый каскад малошумящего усилителя с коэффициентом усиления 10...15 дБ. Эта часть радиотермометра располагается в антенне и соединяется со вторым блоком при помощи коаксиального кабеля. Во втором блоке осуществляется усиление СВЧ-сигнала, его фильтрация, детектирование и аналогово-цифровое преобразование. Дальнейшая обработка сигнала производится в ноутбуке. Это достаточно компактный радиотермометр. В [20]-[22] представлены интересные результаты разработки миниатюрных радиотермометров. В [20], [21] описан компактный радиотермометр, работающий в диапазоне частот 1,4...1,427 ГГц. Для повышения помехозащищенности авторы обузили полосу пропускания до 27 МГц. Структура радиотермометра близка к прибору из работы [19] и включает в себя два референсных источника шума, электронный выключатель, двухкаскадный малошумящий усилитель, два полосовых фильтра и чувствительный амплитудный детектор. В работе [22] рассмотрены вопросы реализации беспроводного носимого многочастотного радиотермометра. Особенность этого радиотермометра состоит в том, что он работает на нескольких частотах,

что позволяет измерять температуру на разных глубинах. Потенциально этот радиотермометр может быть реализован в монолитном исполнении. Радиотермометры, описанные в работах [20]-[22], построены на основе радиотермометра полной мощности и не содержат невзаимных элементов. Пока в научной литературе представлено мало экспериментальных данных, демонстрирующих, как меняются результаты измерений у подобных приборов при изменении импеданса исследуемого биологического объекта (далее – БО). Традиционные радиотермометры без невзаимных элементов имеют значительную погрешность при изменении входного импеданса БО. Подобные устройства можно использовать для исследования характера изменения температуры во времени, предварительно проведя калибровку прибора в исследуемой области. Поэтому для того, чтобы результаты измерения не зависели от диэлектрической проницаемости исследуемых тканей, желательно использовать балансный нуль-радиотермометр со схемой компенсации отражений. В работе [7] представлен миниатюрный одноканальный радиотермометр с печатной антенной для приема микроволнового излучения головного мозга в диапазоне 3,6 ГГц. В приборе используется балансный нуль-радиотермометр с отрицательной петлей обратной связи. В качестве источника шумового сигнала используется СВЧ-нагрузка, установленная на элементе Пельтье. Радиотермометр имеет сравнительно небольшие размеры:  $76 \times 54 \times 22 \text{ мм}^3$ . Эта работа является первым шагом на пути миниатюризации микроволновых радиотермометров с невзаимными элементами.

В работе [23] представлен одноканальный радиотермометр, построенный на основе схемы R.H. Dicke балансного нуль-радиотермометра со скользящей схемой компенсации отражения с двумя согласованными нагрузками. Погрешность измерения данного прибора не зависит от температуры окружающей среды, собственной температуры прибора и импеданса БО. Показано, что радиотермометр (3,4...4,2 ГГц) может использоваться для выявления различных заболеваний и контроля внутренней температуры тканей в процессе лечения.

Исследования в области создания многоканальных и многочастотных радиотермометров представлены в [24]-[34]. Регистрация информации осуществляется многоканальным радиотермометром с антеннами, настроенными на различные частоты, или одноканальным радиотермометром многочастотного действия. Известно несколько многоканальных приборов, позволяющих проводить динамический мониторинг температуры. Данные приборы позволяют получать информацию о температуре внутренних тканей одновременно в нескольких точках тела пациента в соответствии с числом приемных антенн и строить динамические распределения температуры. В [24] представлен микроволновый радиотермометр, предназначенный для диагностики заболеваний молочных желез. Так же, как и радиотермометр [14], это прибор является одноканальным. Измерения производятся одновременно в пяти частотных диапазонах, что открывает возможность определять характер измерения температуры по глубине. В данном радиотермометре используется широкополосная антенна, работающая в частотном диапазоне 1...4 ГГц. Все функциональные части прибора располагаются в одном датчике. Это очень перспективная разработка, и на следующем этапе работы авторы планируют перейти к созданию прототипа изделия.

В работе [25] представлена информация о разработке 20-канального радиотермометра для визуализации тепловых изменений головного мозга. Этот прибор имеет 20 приемных каналов и 20 антенн. Рабочий диапазон – 780 МГц или 1,5 ГГц с полосой 200 МГц. Для приема собственного излучения используется балансный дайковский 20-канальный микроволновый радиометр, работающий на схеме с пилот-сигналом известной мощности для измерения коэффициента отражения, что позволяет учесть рассогласование антенны с разными тканями. В качестве антенны используется антенный модуль с U-образным диполем-аппликатором. Прибор позволяет получать информацию одновременно с нескольких точек и строить «радиотепловые карты» организма.

В работе [26] приведены результаты измерений радиотеплового излучения головного мозга в диапазоне  $(3,2 \pm 0,45)$  ГГц. Используется многоканальный радиометр с фазированной антенной решеткой. В качестве элемента решетки используется печатная конформная антенна с излучателем, имеющим L-образный вырез. Данная антенная система, по мнению авторов, требует дополнительных исследований, чтобы определить ее потенциальную ценность в клинической практике.

В работе [27] представлен метод, подходящий для оценки глубинного распределения температуры с помощью многочастотного радиотермометра. Прибор является 3-частотным балансным модуляционным дайковским радиотермометром, работающим в разных диапазонах: 1,5 ГГц с полосой 180 МГц, 2,9 ГГц с полосой 390 МГц и 4,4 ГГц с полосой 485 МГц. Результаты эксперимента подтвердили, что для одного однородного мышечного слоя такой подход позволяет оценить глубинный профиль температуры. Для БО необходимо использовать радиотермометр, работающий на пяти частотах.

В [28] для приема собственного излучения применяют дайковский 5-частотный радиотермометр (1,25; 1,75; 2,25; 2,75; 3,25; 3,75 с рабочей полосой 500 МГц в каждом диапазоне). В качестве антенны используются печатные антенны на базе спирального излучателя. Авторы планировали использовать данный прибор для контроля гипертермии, вспомогательной дополнительной процедуры в терапии онкологических заболеваний.

Для регистрации внутреннего излучения головного мозга авторами исследования [29]-[31] применяется пятичастотный дайковский радиотермометр (1,2; 1,65; 2,3; 3,0 и 3,6 ГГц с полосой 400 МГц в каждом). В качестве приемной антенны используют волновод прямоугольного сечения, измеряющий температуру биологической ткани через водный болюс. Прибор позволяет получать информацию с разных глубин головного мозга и восстанавливать профиль температуры. Температурные разрешения, полученные для каждого приемника, составляют 0,183; 0,273; 0,148; 0,108 и 0,118 °C для приемников 1,2; 1,65; 2,3; 3,0 и 3,6 ГГц соответственно [31]. Однако, по данным [31], если проводимость мозга оценивается неправильно на 10 %, это приводит к ошибке 0,3...0,4 °C. Результат этой работы обнадеживает в отношении осуществления радиотермического измерения профиля температуры в голове ребенка. Но, по данным [30], точность измерения, которая является разницей между расчетной температурой с использованием радиотермометра и температурой, измеренной термопарой на глубине 5 см, составила около 2 °C. Результат не является удовлетворительным для клинического применения, точность должна быть лучше 1 °C. Для аналогичной медицинской задачи создан 2-частотный балансный дайковский радиотермометр (1,2 ГГц и 3,0 ГГц) [32]. В работе [33] представлен многоканальный 2-частотный радиотермометр. Приведены результаты разработки основных узлов и экспериментального образца многоканальной радиотермической системы для неинвазивной диагностики функционального состояния головного мозга. Для повышения эффективности радиотермометрии разработана конструкция миниатюрной печатной антенны на базе щелевого излучателя, которая может быть элементом многоканальной системы [34].

Все вышеперечисленные разработки объединяет ряд особенностей: возможность оценивать характер изменения температуры по глубине, стационарное применение, значительные размеры, необходимость использования экранирующего помещения. Основным недостатком этих приборов состоит в том, что они не обладают помехозащищенностью и могут использоваться только в специальных экранированных помещениях, что затрудняет их практическое применение. Большинство радиотермометров пока используются только в научных целях и не имеют разрешения на применение.

Решением проблемы преодоления указанных выше научно-технических барьеров может являться использование схемы построения миниатюрного радиотермометра, как в работе

[23]. Эта схема должна иметь в своем составе невзаимный элемент для обеспечения независимости погрешности измерения от импеданса БО.

## Заключение

Таким образом, перспективным является объединение в одном радиотермометрическом комплексе принципов многоканальности, многочастотности и миниатюризации, что приведет к расширению его функциональных возможностей и существенному уменьшению размеров. Это позволит использовать радиотермограф не только для измерений собственного излучения тела человека в микроволновом диапазоне через кожные покровы, но и для измерения радиоярких температур через естественные полости, а в перспективе сделает возможным за счет применения технологии МИС использование его в качестве инвазивного биосенсора. Очевидно, что появление доступного и недорогого прибора для ранней диагностики большого количества заболеваний даст мощный импульс дальнейшему развитию персонализированной медицины.

*Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00349).*

## Список литературы:

1. *Vesnin S.G. et al.* Modern microwave thermometry for breast cancer // J. Mol. Imag. Dynamic. 2017. Vol. 7. № 136. PP. 10.1109.
2. *Sedankin M.K. et al.* Mathematical simulation of heat transfer processes in a breast with a malignant tumor // Biomed. Eng. 2018. Vol. 52. № 3. PP. 190-194.
3. *Cheboksarov D.V. et al.* Diagnostic opportunities of noninvasive brain thermomonitoring // Anesteziologija i Reanimatologija. 2015. Vol. 60. № 1. PP. 66-69.
4. *Gudkov A.G. et al.* Element base for radio passive device / Proceedings of the Russian-Bavarian Conference on Biomedical Engineering. 29-31 May 2012. Saint Petersburg. 2012. PP. 154-155.
5. *Вьюгинов В.Н. и др.* Электронный модуль многоканального СВЧ-тракта для систем радиотермокартирования // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 1. С. 027-034.
6. *Анзимиров В.Л. и др.* Современные возможности и перспективы нейротермопловидения // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 3. С. 49-54.
7. *Sedankin M.K. et al.* Development of a miniature microwave radiothermograph for monitoring the internal brain temperature // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 3. № 5. PP. 26-36.
8. *Toutouzas K. et al.* Noninvasive detection of increased carotid artery temperature in patients with coronary artery disease predicts major cardiovascular events at one year: Results from a prospective multicenter study // Atherosclerosis. 2017. Vol. 262. PP. 25-30.
9. *Drakopoulou M. et al.* The role of microwave radiometry in carotid artery disease. Diagnostic and clinical prospective // Current opinion in pharmacology. 2018. Vol. 39. PP. 99-104.
10. *Kublanov V.S.* Radiophysical system for examining functional state of a patient's brain // Biomedical Engineering. 2009. Vol. 43. № 3. PP. 114-119.
11. *Pentazos G. et al.* Microwave radiometry-derived thermal changes of small joints as additional potential biomarker in rheumatoid arthritis: A prospective pilot study // JCR: J. of Clinical Rheumatology. 2018. Vol. 24. № 5. PP. 259-263.
12. *Kaprin A.D. et al.* Microwave radiometry in the diagnosis of various urological diseases // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53. № 2. PP. 87-91.
13. *Ivanov Y. et al.* Use of microwave radiometry to monitor thermal denaturation of albumin // Frontiers in Physiology. 2018. Vol. 9. P. 956.

14. *Toutouzas K. et al.* Microwave radiometry: A new non-invasive method for the detection of vulnerable plaque // *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*. 2012. Vol. 2. № 4. PP. 290-297.
15. *Gudkov A. et al.* Prospects for application of radio-frequency identification technology with passive tags in invasive biosensor systems // *Biomedical Engineering*. 2015. Vol. 49. № 2. PP. 98-101.
16. *Gudkov A.G.* Optimal designing of microstrip discrete phase-stable attenuator with allowance for production technology // *Radiotekhnika*. 2004. Vol. 2. PP. 67-72.
17. *Emtsev V.V. et al.* The relationship between the reliability of transistors with 2D AlGaIn/GaN channel and organization type of nanomaterial // *Technical Physics Letters*. 2016. Vol. 42. № 7. PP. 701-703.
18. *Judicello S., Bardati F.* Microwave radiometry for breast cancer detection / *Dottorato di ricerca in Geoinformazione, Universita'degli studi di Roma «Tor Vergata»*. 2009.
19. *Stauffer P.R. et al.* Stable microwave radiometry system for long term monitoring of deep tissue temperature / *Energy-based Treatment of Tissue and Assessment VII. International Society for Optics and Photonics*. 2013. Vol. 8584. P. 85840R.
20. *Momenroodaki P., Haines W., Popović Z.* Non-invasive microwave thermometry of multilayer human tissues / 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). IEEE, 2017. PP. 1387-1390.
21. *Momenroodaki P. et al.* Noninvasive Internal Body Temperature Tracking With Near-Field Microwave Radiometry // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017. Vol. 66. № 5. PP. 2535-2545.
22. *Popovic Z., Momenroodaki P., Scheeler R.* Toward wearable wireless thermometers for internal body temperature measurements // *IEEE Communications Magazine*. 2014. Vol. 52. № 10. PP. 118-125.
23. *Vesnina S. et al.* Research of a microwave radiometer for monitoring of internal temperature of biological tissues // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4. PP. 6-15.
24. *Livanos N.A. et al.* Design and interdisciplinary simulations of a hand-held device for internal-body temperature sensing using microwave radiometry // *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18. № 6. PP. 2421-2433.
25. *Агасиева С.В., Сидоров И.А. и др.* Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ / Под ред. А.Г. Гудкова и В.В. Попова. Книга 2. – М.: ООО «Авто-тест», 2013. 214 с.
26. *Asimakis N.P., Karanasiou I.S., Uzunoglu N.K.* Non-invasive microwave radiometric system for intracranial applications: A study using the conformal L-notch microstrip patch antenna // *Progress in Electromagnetics Research*. 2011. Vol. 117. PP. 83-101.
27. *Stec B., Dobrowolski A., Susek W.* Multifrequency microwave thermograph for biomedical applications // *IEEE Transactions on biomedical engineering*. 2004. Vol. 51. № 3. PP. 548-550.
28. *Jacobsen S., Stauffer P.R.* Multifrequency radiometric determination of temperature profiles in a lossy homogeneous phantom using a dual-mode antenna with integral water bolus // *IEEE Tran. on Mic. Th. and Tech.* 2002. Vol. 50. № 7. PP. 1737-1746.
29. *Hand J.W. et al.* Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modeling // *Physics in Medicine & Biology*. 2001. Vol. 46. № 7. PP. 1885-1903.
30. *Sugiura T. et al.* Five-band microwave radiometer system for noninvasive brain temperature measurement in newborn babies: Phantom experiment and confidence interval // *Radio Science*. 2011. Vol. 46. № 5. PP. 1-7.
31. *Sugiura T. et al.* Five-band microwave radiometer system for non-invasive measurement of brain temperature in new-born infants: System calibration and its feasibility / *The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE*, 2004. Vol. 1. PP. 2292-2295.
32. *Bardati F., Marrocco G., Tognolatti P.* New-born-infant brain temperature measurement by microwave radiometry / *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (IEEE Cat. No. 02CH37313)*. 2002. Vol. 1. PP. 811-814.
33. *Gudkov A.G. et al.* Use of multichannel microwave radiometry for functional diagnostics of the brain // *Biomed. Eng.* 2019. Vol. 53. № 2. PP. 108-111.
34. *Седанкин М.К. и др.* Многоканальный микроволновый радиотермометр / *Международная научно-техническая конференция «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике»*. 2017. С. 348-350.

*Александр Григорьевич Гудков,*  
*д-р техн. наук, профессор,*  
*Виталий Юрьевич Леушин,*  
*канд. техн. наук, доцент,*  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,*  
*Сергей Георгиевич Веснин,*  
*канд. техн. наук, генеральный директор,*  
*ООО «Фирма «РЭС»,*  
*Игорь Александрович Сидоров,*  
*канд. техн. наук, начальник отдела,*  
*АО «Концерн «Вега»,*  
*Михаил Константинович Седанкин,*  
*канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,*  
*ФГБУ ГНЦ ФМБЦ*  
*им. А.И. Бурназяна ФМБА России,*  
*г. Москва,*  
*Юрий Владимирович Соловьев,*  
*канд. техн. наук,*  
*начальник ОР и ПП на основе АЗВ5 и А4В4,*  
*АО «Светлана-Электронприбор»,*  
*г. С.-Петербург,*  
*Светлана Викторовна Агасиева,*  
*канд. техн. наук, доцент,*  
*ФГАОУ ВО «Российский*  
*университет дружбы народов»,*  
*Сергей Владимирович Чижиков,*  
*аспирант,*  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,*  
*Дмитрий Анатольевич Горбачев,*  
*инженер 1-й категории,*  
*аспирант заочной аспирантуры,*  
*АО «Концерн «Вега»,*  
*Святослав Игоревич Видякин,*  
*аспирант,*  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,*  
*г. Москва,*  
*e-mail: ooo.giperion@gmail.com*