

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS,
INSTRUMENT MAKING
AND COMMUNICATIONS

УДК 681.2

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-105-120

Электромагнитная система для деструкции биологических тканей на частоте 27,12 МГц*

С.В. БЕЛАВСКАЯ^a, Л.И. ЛИСИЦЫНА^b, В.П. РАЗИНКИН^c,
Е.К. ВИНСКАЯ^d, В.А. ХРУСТАЛЁВ^e, А.Н. КУЗЬМИН^f, А.В. МАРКОВ^g

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

^a Svetlana.belana@yandex.ru ^b lisitcinali@gmail.com ^c razinkin_vp@mail.ru

^d katerinavns@gmail.com ^e va_khrustalev@ngs.ru ^f anton@kuz-min.ru

^g markovav@corp.nstu.ru

Представлены результаты исследования деструкции биологических тканей высокочастотным электромагнитным излучением на разрешенной частоте 27,12 МГц в сравнении с деструкцией на разрешенной частоте 13,56 МГц при одинаковой мощности воздействующего излучения 30 Вт. Сегодня все известные приборы высокочастотной электромагнитной деструкции на частоте 27,12 МГц используются для проведения поверхностных неглубоких операций (удаление папиллом, родинок и т. д.). Разработка высокочастотной электромагнитной системы для деструкции глубоких, плотных тканей (костных, хрящевых), а также злокачественных новообразований на указанной частоте является актуальнейшей задачей современности. Для проведения исследования на указанной частоте разработана и реализована экспериментальная установка на современной элементной базе, отличительная особенность которой – обеспечение стабильной и надежной работы используемых транзисторных усилителей мощности при сохранении их работоспособности в широком диапазоне изменения нагрузки (от холостого хода до короткого замыкания). Эта особенность реализована за счет использования двухканального мостового усилительного тракта. Для испытания работоспособности установки использован мультиметр с функцией тепловизора и измеритель иммитанса. Форма выходного сигнала установки – синусоида, вторая гармоника ослаблена по отношению к основной на 60 дБ. Исследования проведены *in vitro* на биоптатах мышечных, костных тканей и печени крупного рогатого скота, а также на свином кожном покрове. Разрезы биологической ткани, выполненные на частоте 27,12 МГц, имеют глубокую коагуляцию, а на частоте 13,56 МГц в месте коагуляции уже наблюдается карбонизация мышечной ткани; деструкция костной ткани и печени на частоте 27,12 МГц более ярко выражена, на частоте 13,56 МГц в области деструкции появляются элементы карбонизации; воздействие высокочастотным излучением на частоте 27,12 МГц происходит с меньшим влиянием на окружающие ткани, чем на частоте 13,56 МГц; проколы мышечной ткани и печени, выполненные на разных частотах, практически не различаются; температура в области электрического разряда, возникающая на частоте 27,12 МГц при мощности излучения 30 Вт, выше

* Статья получена 13 февраля 2023 г.

150 °С (на частоте 13,56 МГц – 126 °С); температуру в области разряда на частоте 27,12 МГц можно снизить до температуры, как на частоте 13,56 МГц, уменьшив мощность электромагнитного излучения в 1,5 раза.

Ключевые слова: биологическая ткань, деструкция, разряд высокочастотный, абляция, 27,12 МГц, коагуляция, карбонизация, температура, вторая гармоника

ВВЕДЕНИЕ

Деструкция биологических тканей широко используется в медицинской практике (в косметологии, ортопедии, травматологии, хирургии и др.) [1–21]. Современные способы абляции, основанные на повышении температуры биологической ткани, – радиочастотная (РЧА) и микроволновая (МВА). РЧА и МВА имеют свои достоинства и недостатки. Их недостатки можно ликвидировать, выполняя процесс абляции на высокой частоте от 3 до 30 МГц в соответствии с ГОСТ Р 52002-2003 и ГОСТ Р 51318.11-99 (СИСПР 11-97). Авторами статьи [22] проведены исследования на разрешенной частоте 13,56 МГц, показавшие возможность выполнения резекции и коагуляции биологических тканей (БТ) воздействующим электромагнитным излучением на этой частоте. Показано, что результат достигается высокой скоростью практически при минимальном воздействии на окружающие ткани.

Сегодня считается, что микроволновая абляция (частоты 945...2450 МГц) предпочтительнее радиочастотной абляции (частоты до 500 кГц) и обладает рядом преимуществ [22].

Однако использование метода МВА на практике затруднено в связи с высоким нагревом антенны, с воздействием СВЧ-излучения, вредного для организма человека, и с высокой стоимостью систем микроволновой абляции (до 7 млн руб.).

Существующие системы высокочастотной электромагнитной деструкции в настоящее время используются для проведения поверхностных, неглубоких операций [23]. Поэтому разработка высокочастотной электромагнитной системы для абляции глубоких и плотных тканей, а также злокачественных новообразований – актуальная задача современности.

1. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Провести исследование использования высокочастотного электромагнитного излучения на частоте 27,12 МГц для деструкции глубокорасположенных, костных и хрящевых биологических тканей. С этой целью разработать и реализовать генератор стоимостью не более 1 млн рублей на указанную частоту на современной элементной базе. Провести экспериментальные исследования и сравнить полученные результаты с экспериментальными результатами деструкции на частоте 13,56 МГц.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

2.1. ОСНОВНЫЕ ПРИБОРЫ, УСТРОЙСТВА И БИОПТАТЫ

1. Высокочастотный генератор (27,12 МГц).

Требуемые параметры разрабатываемого генератора:

- рабочая частота – 27,12 МГц,

- мощность – 50...100 Вт, в рабочей зоне – 30...60 Вт,
 - форма выходного сигнала – синусоида,
 - допустимо ослабление второй гармоники выходного сигнала по отношению к основной не менее чем на 50 дБ,
 - изменение параметров при изменении условий внешней среды не более 5 %,
 - допустимый уровень радиопомех.
2. ВЧ-генератор с рабочей частотой 13,56 МГц, параметры которого указаны в [22].
 3. Медицинский хирургический инструмент (излучатель – игла из медицинской стали).
 4. Осциллограф типа OWON PDS 5022S.
 5. Спектроанализатор HAMEG 5510.
 6. Мультиметр типа СЕМ DT-898 с функцией тепловизора.
 7. Мультиметр типа Tonghui TH2822A.
 8. Биоптаты – кожный покров, мышечные и костные ткани и печень животных [17].

2.2. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Структурная схема разработанной высокочастотной электромагнитной системы представлена на рис. 1.

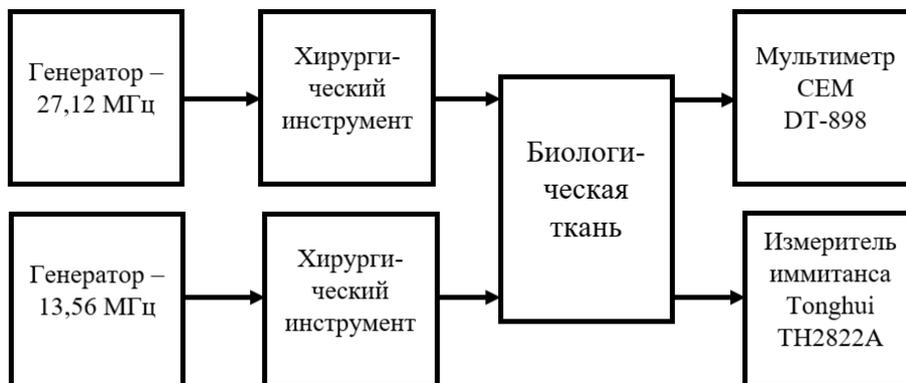


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of the experimental setup

2.2. РАЗРАБОТКА ВЧ-ГЕНЕРАТОРА НА РАБОЧУЮ ЧАСТОТУ 27,12 МГц НА СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

Отличительная особенность разрабатываемого генератора – обеспечение стабильной и надежной работы используемых транзисторных усилителей мощности при сохранении их работоспособности в широком диапазоне изменения нагрузки (от холостого хода до короткого замыкания). Эту особенность предлагается реализовать за счет использования двухканального мостового усилительного тракта.

В разработанном двухканальном усилителе с выходной мощностью 100 Вт, выполненном по мостовой структуре, используются делитель и сумматор ВЧ-сигналов, каждый из которых реализован на двух одинаковых отрезках коаксиальной линии передачи со стандартным волновым сопротивлением 75 Ом. Физическая длина отрезков коаксиальной линии передачи определяется отношением

$$L = \frac{0,196\lambda}{\sqrt{\varepsilon_p}}, \quad (1)$$

где L – длина отрезков коаксиальной линии передачи; λ – длина волны, соответствующая рабочей частоте f ; ε_p – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика отрезков линий передачи.

Развязка между выходами делителя (входами сумматора) ВЧ-сигналов обеспечивается балластной нагрузкой в виде планарного пленочного резистора на подложке из бериллиевой керамики. Для компенсации влияния паразитной емкости планарного пленочного резистора на входе делителя и на выходе сумматора установлен конденсатор, емкость которого равна

$$C = \frac{\sqrt{2}}{2\pi f R_0}, \quad (2)$$

где R_0 – входное сопротивление делителя (сумматора) ВЧ-сигналов.

Соотношения (1) и (2) получены методом четного и нечетного возбуждения с учетом выполнения режима согласования как по входу, так и по выходу делителя (сумматора) ВЧ-сигнала.

Предложена и реализована структурная схема ВЧ-генератора на частоту 27,12 МГц (рис. 2).



Рис. 2. Схема ВЧ-генератора на частоту 27,12 МГц

Fig. 2. Scheme of the RF generator at a frequency of 27.12 MHz

Параметры разработанного генератора соответствуют заданным. Форма выходного сигнала – синусоида (рис. 3).

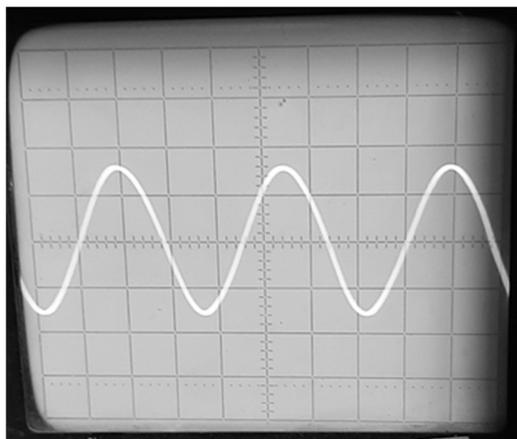


Рис. 3. Выходной сигнал генератора

Fig. 3. Generator output

На рис. 4 представлена картина частотного спектра выходного сигнала генератора, полученная с помощью спектроанализатора HAMEG 5510, откуда видно, что вторая гармоника выходного сигнала ослаблена на 60 дБ по отношению к основной, что соответствует техническому заданию.

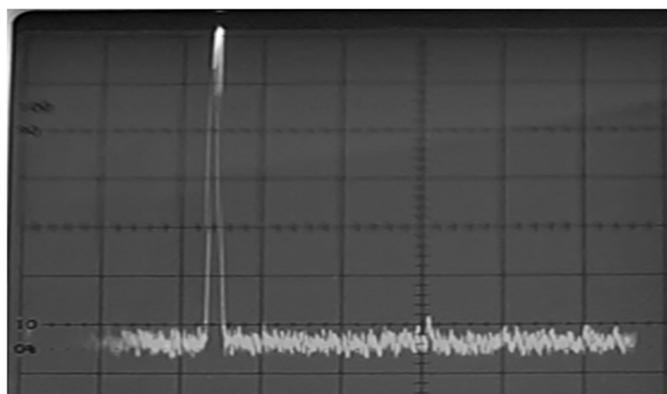


Рис. 4. Картина спектра выходного сигнала генератора

Fig. 4. Spectrum pattern of the oscillator output signal

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проведены *in vitro* на биоптатах на частотах 27,12 МГц и 13,56 МГц (для сравнения) при одинаковой мощности воздействующего излучения 30 Вт.

Результаты исследований приведены на нижерасположенных рисунках, где индекс 1 – при частоте 27,12 МГц, индекс 2 – при частоте 13,56 МГц.

Абляция проведена неинвазивным и инвазивным способами. При проведении инвазивной абляции использован излучатель – стальной стержень диаметром около 1,3 мм. Абляция неинвазивным способом выполнена сканированием излучателя по поверхности образца.

Изменение структуры биотканей оценивалось по динамике электрического сопротивления.

На рис. 5 представлена фотография свиного кожного покрова с разрезами, выполненными за 5 секунд. Начальное сопротивление биоптата – 600 Ом. На фотографии видно, что разрезы практически не отличаются, однако на краях разреза на частоте 13,56 МГц карбонизация произошла в большей степени. Это подтверждается измерением электрического сопротивления: в области разреза 1 сопротивление составляет 1,1 кОм, в области разреза 2 сопротивление будет 1 кОм. На расстоянии 1 мм от каждого из разрезов электрическое сопротивление составляет 800 Ом, а на расстоянии 2 мм – уже 600 Ом. Следовательно, разрезы выполнены почти без влияния на окружающие участки.

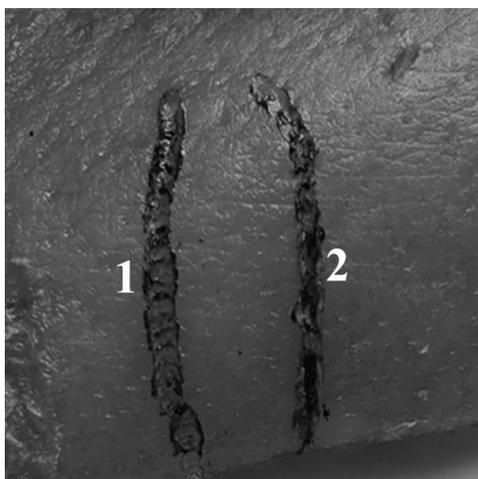


Рис. 5. Фотография свиного кожного покрова с разрезами

Fig. 5. Photo of pig skin with incisions

Также были проведены разрезы биологических тканей (БТ) (рис. 6) с начальным электрическим сопротивлением 700 Ом. Разрезы выполнены за 3 секунды каждый.

На рис. 6 явно видно, что на частоте 27,12 МГц разрез имеет глубокую коагуляцию, а на частоте 13,56 МГц на месте коагуляции уже наблюдается карбонизация мышечной ткани. Это же подтверждается на зависимости электрического сопротивления от расстояния до разреза (центр разреза – исследуемая точка), график которого представлен на рис. 7. При воздействии полем на частоте 27,12 МГц окружающие участки ткани вокруг разреза затронуты в меньшей степени, чем на частоте 13,56 МГц.

Далее была исследована высокочастотная абляция инвазивным способом мышечной ткани (толщиной 7 мм) и печени (толщиной 15) мм крупного рогатого скота (рис. 8). Все проколы выполнены за 5 секунд, глубина прокола – на всю толщину образца, диаметр прокола 2 мм, область абляции вокруг прокола ~1,5 мм. Начальное электрическое сопротивление мышечной ткани составляет 2 кОм, в области абляции – 7 кОм (в обоих случаях). Начальное электрическое сопротивление печени – 4 кОм; после обработки высокочастотным излучением, так же как и у мышечных тканей, сопротивление в области абляции

в обоих случаях составляет 9 кОм. Следовательно, результаты инвазивной высокочастотной абляции методом прокола при частотах 13,56 МГц и 27,12 МГц практически не отличаются.

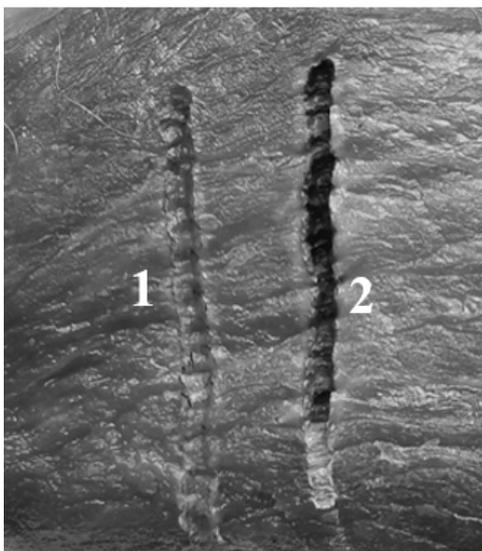


Рис. 6. Фотография мышц крупного рогатого скота с разрезами

Fig. 6. Photo of cattle muscles with incisions

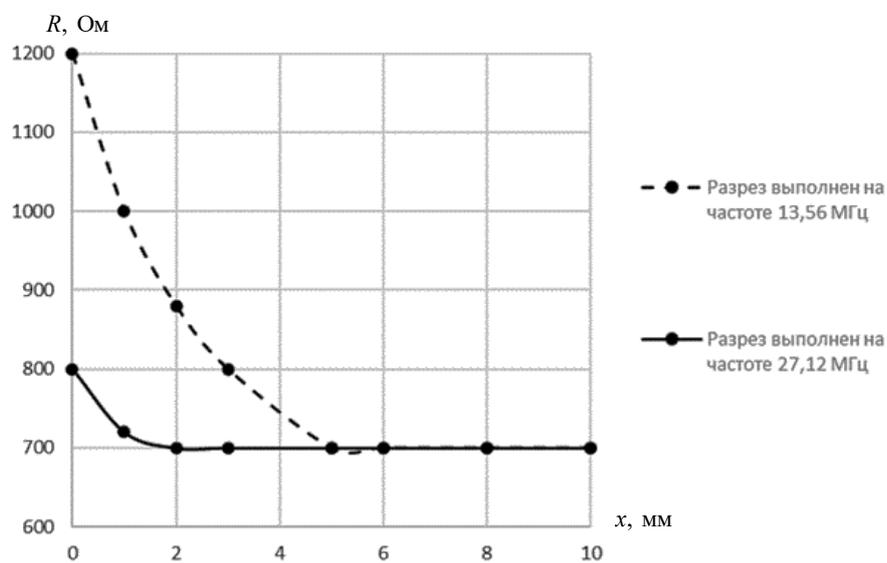


Рис. 7. Зависимость изменения электрического сопротивления мышечной ткани от расстояния (центр разреза – исследуемая точка)

Fig. 7. The dependence of the change in the electrical resistance of muscle tissue on the distance (the center of the incision is the point under study)

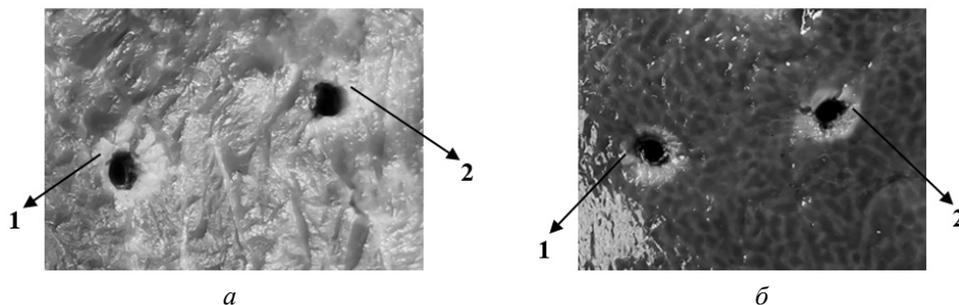


Рис. 8. Фотографии участков мышц (а) и печени (б) крупного рогатого скота с проколами

Fig. 8. Photos of muscle (a) and liver (b) areas of cattle with punctures

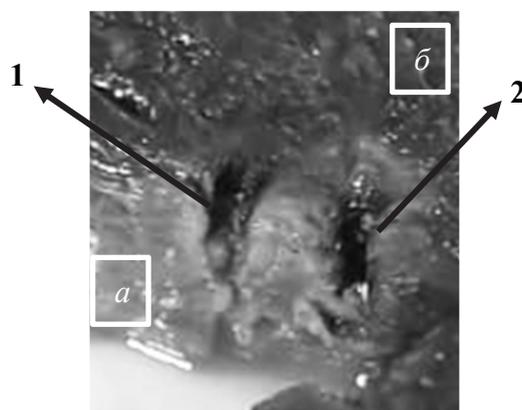


Рис. 9. Фотографии биоптата мышечной ткани с проколами в разрезе:

а – область среза, б – поверхность биоптата

Fig. 9. Muscle biopsy photos muscle tissue with punctures in the section:

1 is the area of the cut, 2 is the surface of the biopsy

На фотографии биоптата печени (рис. 10) абляция выполнена за 30 секунд каждая неинвазивным способом на разных частотах. Площадь абляции составляет 1...1,5 см². При деструкции на частоте 13,56 МГц проявляется заметная карбонизация ткани, тогда как на частоте 27,12 МГц имеется только коагуляция.

Исследование зависимости электрического сопротивления от расстояния до области деструкции представлено на рис. 11. Из графика видно, что деструкция на частоте 13,56 МГц в большей степени воздействует на окружающие ткани.

Абляция костной ткани также проведена неинвазивным способом (рис. 12). Время выполнения абляции на площади 1 см² на каждой из частот составляет 60 секунд. Результаты проведенных деструкций аналогичны результатам на печени. Начальное электрическое сопротивление костной ткани составляло 20 кОм, однако после воздействия в обоих случаях сопротивление стало более 100 МОм.

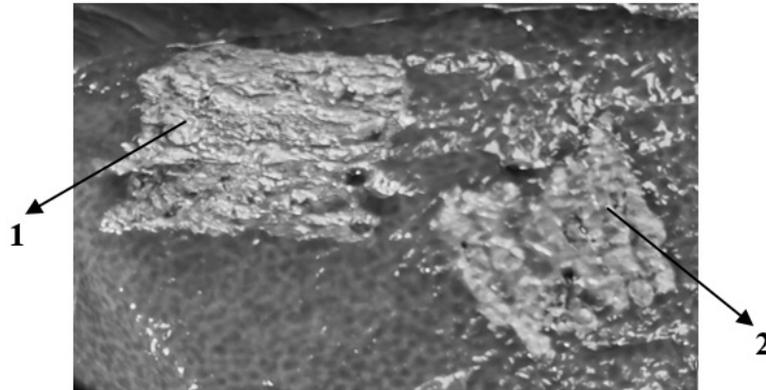


Рис. 10. Фотография участка печени с деструкцией
Fig. 10. Photo of a section of the liver with destruction

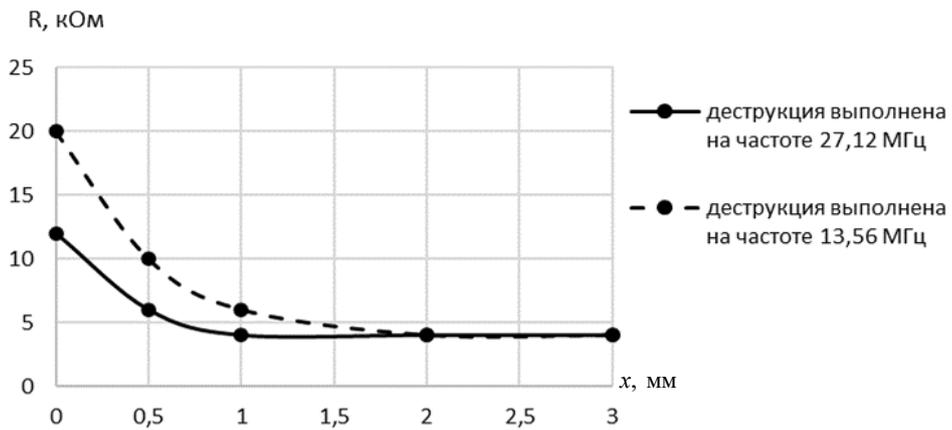


Рис. 11. Зависимость электрического сопротивления говяжьей печени от расстояния (граница деструкции – исследуемая точка)

Fig. 11. Dependence of the electrical resistance of beef liver on the distance (the destruction boundary is the point under study)

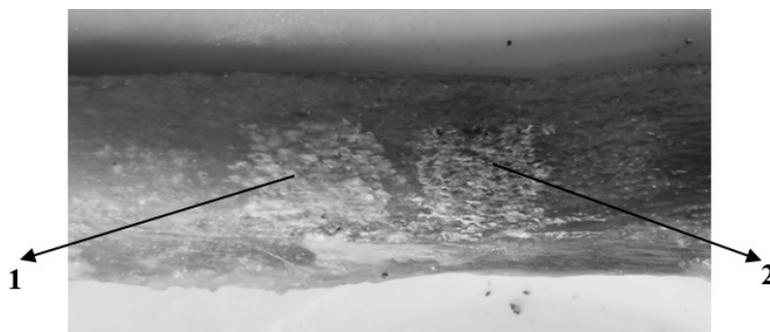


Рис. 12. Фотография костной ткани с областями деструкции

Fig. 12. Photo of bone tissue with areas of destruction

На рис. 13 представлена фотография разряда между излучателем и биоптатом, а также фотография фиксации участка разряда на экране мультиметра при мощности воздействующего сигнала 30 Вт.

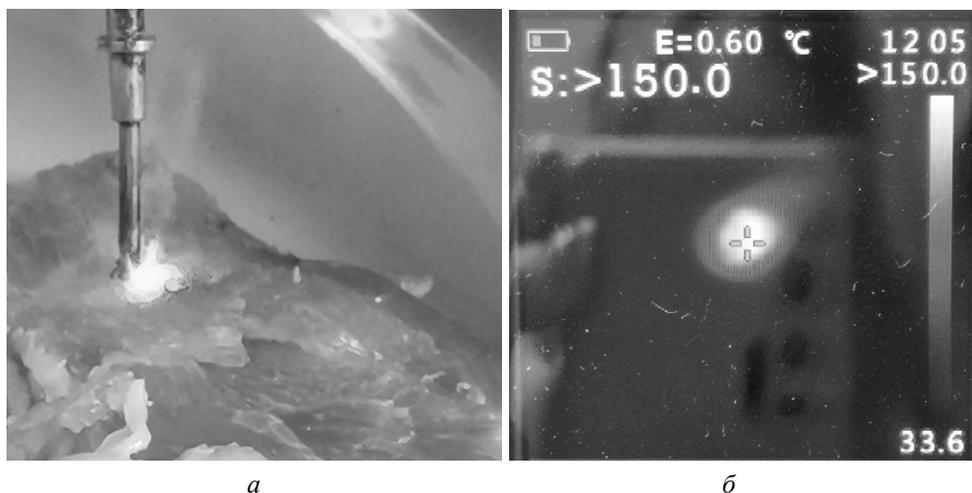


Рис. 13. Фотография разряда между излучателем и биоптатом мышечной ткани при осуществлении абляции на частоте 27,12 МГц (а), фотография участка разряда на экране мультиметра (б)

Fig. 13. Photo of the discharge between the emitter and the biopsy muscle tissue during ablation at a frequency of 27.12 MHz (a), photo of the discharge area on the multimeter screen (b)

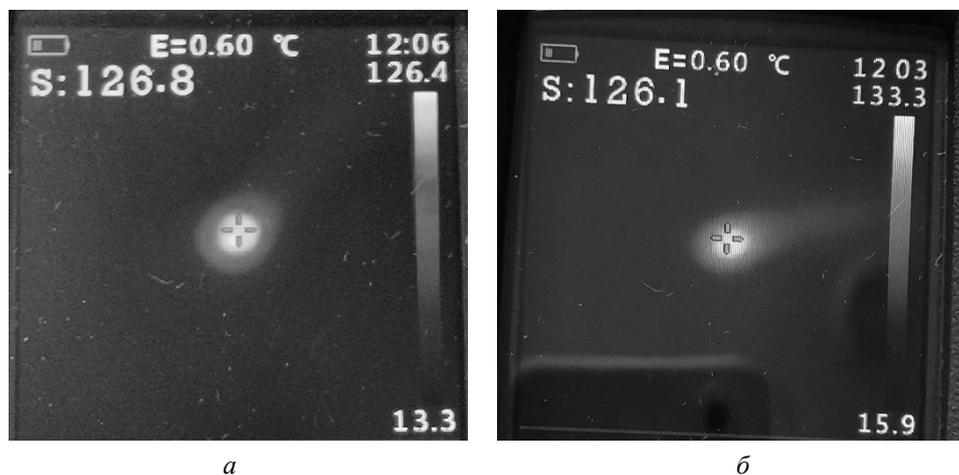


Рис. 14. Фотографии фиксации участка разряда на экране мультиметра при воздействии излучением:

а – 13,56 МГц при мощности излучения 30 Вт; б – 27,12 МГц при мощности излучения 20 Вт

Fig. 14. Photos of fixing the discharge area on the multimeter screen when exposed to electromagnetic radiation:

а – 13.56 MHz at a radiation power of 30 watts; б – 27.12 MHz at a radiation power of 20 watts

Фотография с разрядом, выполненным на частоте 13,56 МГц, практически не отличается от рис. 13, а. Но температура в области разряда при этом 126,8 °С (рис. 14, а). На биоптате при воздействии электромагнитным излучением на частоте 27,12 МГц можно получить такую же температуру (рис. 14, б), как при воздействии излучением на частоте 13,56 МГц, уменьшив мощность воздействующего излучения до 20 Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных фотографий и графиков позволяет сделать следующие выводы.

1. Разрезы биологической ткани, выполненные на частоте 27,12 МГц, имеют глубокую коагуляцию, а на частоте 13,56 МГц в месте коагуляции уже наблюдается карбонизация мышечной ткани.

2. Деструкция костной ткани и печени на частоте 27,12 МГц более ярко выражена, на частоте 13,56 МГц в области деструкции появляются элементы карбонизации.

3. Воздействие высокочастотным излучением на частоте 27,12 МГц происходит с меньшим влиянием на окружающие ткани, чем на частоте 13,56 МГц.

4. Проколы мышечной ткани и печени, выполненные на разных частотах, практически не различаются.

5. Температура в области электрического разряда, возникающая на частоте 27,12 МГц при мощности излучения 30 Вт, выше 150 °С (на частоте 13,56 МГц – 126 °С).

6. Температуру в области разряда на частоте 27,12 МГц можно снизить до температуры, как на частоте 13,56 МГц, уменьшив мощность электромагнитного излучения в 1,5 раза.

Согласно выводам, высокочастотную деструкцию из диапазона ВЧ (3...30 МГц) предпочтительнее использовать на разрешенной частоте 27,12 МГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные методы абляции злокачественных новообразований печени / Л.И. Москвичева, Д.В. Сидоров, М.В. Ложкин, Л.О. Петров, М.В. Забелин // Исследования и практика в медицине. – 2018. – Т. 5, № 4. – С. 58–71.
2. Новый метод микроволновой абляции злокачественных новообразований печени / Д.В. Сидоров, Н.А. Гришин, М.В. Ложкин, В.А. Вишневский, Л.О. Петров // Онкохирургия. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 50.
3. Микроволновая абляция при лечении злокачественных новообразований печени / Д.В. Сидоров, С.О. Степанов, Н.А. Гришин, М.В. Ложкин, Л.О. Петров, О.А. Майновска // Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. – 2013. – № 2. – С. 27–31.
4. Effect of microwave ablation treatment of hepatic malignancies on serum cytokine levels / J. Zhao, Q. Li, M. Muktiali, B. Ren, Y. Hu, D. Li, Z. Li, D. Li, Y. Xie, M. Tao, R. Liang // BMC Cancer. – 2020. – Vol. 20. – P. 812.
5. Результаты радиочастотной абляции при лечении колоректальных метастазов в печени / К.Н. Петренко, Е.О. Барсукова, Л.О. Полищук, Е.П. Фисенко, Г.А. Шатверян, О.Г. Скипенко // Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии. – 2007. – Т. 17, № 3. – С. 84–89.
6. Использование аппарата радиочастотной абляции при резекции печени / В.Д. Федоров, В.А. Вишневский, В.А. Кубышкин [и др.] // Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. – 2004. – № 5. – С. 21–25.

7. Microwave coagulation therapy for hepatic tumors: review of the literature and critical analysis / C. Boutros, P. Somasundar, S. Garrean, A. Saied, N.J. Espat // *Surgical Oncology*. – 2010. – Vol. 19 (1). – P. e22–e32.
8. *Kulaylat M.N., Gibbs J.F.* Thermoablation of colorectal liver metastasis // *Journal of Surgical Oncology*. – 2010. – Vol. 101 (8). – P. 699–705.
9. Small hepatocellular carcinoma in cirrhosis: randomized comparison of radio-frequency thermal ablation versus percutaneous ethanol injection / R.A. Lencioni, H.P. Allgaier, D. Cioni, M. Olschewski, P. Deibert, L. Crocetti, H. Frings, J. Laubenberger, I. Zuber, H.E. Blum, C. Bartolozzi // *Radiology*. – 2003. – Vol. 228 (1). – P. 235–240.
10. *Razafindratsira T., Isambert M., Evrard S.* Complications of intraoperative radiofrequency ablation of liver metastases // *HPB (Oxford)*. – 2011. – Vol. 13 (1). – P. 15–23.
11. Микроволновая абляция в комбинированном лечении первичных опухолей и метастазов печени / М.М. Грандофилов, М.Н. Рудакова, К.Ю. Рябов, О.Ф. Шершнев, А.В. Прохоров // *Анналы хирургической гепатологии*. – 2015. – Т. 20 (4). – С. 34–39. – DOI: 10.16931/1995-5464.2015434-39.
12. *Балахнин П.В., Шмелев А.С., Шачинов Е.Г.* Чрескожная энергетическая абляция опухолей: принципы, технологии, результаты // *Практическая онкология*. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 129–153.
13. Principles of and advances in percutaneous ablation / M. Ahmed, C.L. Brace, F.T. Lee Jr, S.N. Goldberg // *Radiology*. – 2011. – Vol. 258, N 2. – P. 351–369.
14. Радиочастотная абляция как вспомогательный и окончательный метод лечения метастатического поражения печени у больных колоректальным раком / Э.Э. Топузов, М.А. Бобраков, В.К. Балашов, Е.И. Дрогомирецкая, Е.А. Ерохина, О.Н. Кислицина, А.Н. Петряшов, А.Н. Круглов, Р.Э. Топузов, Е.В. Напольская // *Вестник Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова*. – 2017. – Т. 9, № 1. – С. 7–14.
15. Радиочастотная катетерная абляция хронической формы фибрилляции предсердий методом изоляции легочных вен и анатомической модификации субстрата аритмии / А.В. Ардашев, Е.Г. Желяков, Е.А. Долгушина, М.С. Рыбаченко, Д.А. Мангутов, А.В. Конев, С.В. Волошко, О.Ю. Врублевский, М.В. Крючко, Э.Н. Ливенцева // *Кардиология*. – 2008. – № 12. – С. 41–48.
16. История развития радиочастотной абляции в травматологии и ортопедии / М.А. Гвоздев, М.В. Рябинин, А.С. Сапрыкин, Н.Н. Корнилов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2021. – № 1. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=30460> (дата обращения: 30.08.2023).
17. *Тихонов В.Н.* Мини-свиньи – надежда человечества // *Химия и жизнь – XXI век*. – 2011. – № 9. – С. 32–36.
18. *Винская Е.К., Белавская С.В., Лисицына Л.И.* Лазерный контроль степени деструкции биологической ткани // *Наука. Технологии. Инновации: 16 Всероссийская научная конференция молодых ученых, Новосибирск, 5–8 дек. 2022 г.: в 11 ч.* – Новосибирск, 2022. – Ч. 6. – С. 119–123.
19. Абляция костной ткани, выполненная путем воздействия электромагнитным излучением высокочастотного диапазона / Л.И. Лисицына, С.В. Белавская, А.Н. Кузьмин, Е.К. Винская // *Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Российской научно-технической конференции, Новосибирск, 20–21 апр. 2022 г.* – Новосибирск, 2022. – С. 648–652.
20. Comparative analysis of soft biological tissue ablation characteristics obtained by electromagnetic radiation of HF and UHF ranges / S.V. Belavskaya, L.I. Lisitsyna, A.N. Kuzmin, E.K. Vinskaya // *IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM): proceedings, Erlagol, 30 June – 4 July 2022.* – IEEE, 2022. – P. 510–513.
21. *Lisitsyna L.I., Belavskaya S.V., Blokhin A.A.* Utilization of high frequency electrical signal for biological tissue ablation // *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2021): proceedings, Novosibirsk, 19–21 Nov. 2021.* – Novosibirsk, 2021. – P. 72–75.
22. Высокочастотная электромагнитная система для деструкции биологических тканей / С.В. Белавская, Л.И. Лисицына, А.Н. Кузьмин, Е.К. Винская, Л.Г. Навроцкий, В.П. Разинкин, А.А. Блохин // *Системы анализа и обработки данных*. – 2023. – № 1 (89). – С. 55–80. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-55-80.
23. Лазерное или радиоволновое удаление новообразований / Центр лазерной медицины «Лазмед клиника». – URL: <https://lasmed.ru/posts/745/> (дата обращения: 30.08.2023).

Белавская Светлана Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследование биофизических процессов, измерительная техника. Имеет более 200 публикаций, включая 18 авторских патентов РФ. E-mail: Svetlana.belana@yandex.ru

Лисицына Лилия Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка диагностических и терапевтических устройств, исследование биофизических процессов. Имеет более 500 научных публикаций, включая 40 авторских свидетельств и патентов РФ. E-mail: lisitcinali@gmail.com

Разинкин Владимир Павлович, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – широкополосное СВЧ-устройство высокого уровня мощности. Имеет более 160 научных работ, включая 36 патентов РФ на изобретение. E-mail: Razinkin@corp.nstu.ru

Винская Екатерина Константиновна, студент 4-го курса физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. Занимается научными разработками в области разработки устройства по абляции биологических тканей. Имеет 4 научные публикации. E-mail: katerinavns@gmail.com

Хрусталёв Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – широкополосное СВЧ-устройство высокого уровня мощности. Имеет более 180 научных работ, включая 43 патентов РФ на изобретение. E-mail: VA_Khrustalev@ngs.ru

Кузьмин Антон Николаевич, магистр техники и технологии, инженер I кат. НПП «VERSET». Основное направление научных исследований – разработка медицинских устройств, исследование биофизических процессов. Имеет более 40 научных публикаций, включая один патент РФ. E-mail: anton@kuz-min.ru

Марков Артём Владимирович, старший преподаватель кафедры электронных приборов НГТУ, директор инжиниринговой компании «332LAB», ответственный исполнитель более 15 НИОКР, автор 26 научных публикаций.

Belavskaya Svetlana V., PhD (Eng.), associate professor at the Department of Electronic Devices in Novosibirsk State Technical University. The main field of her scientific research is the study of biophysical processes and measuring equipment. She has more than 200 publications, including 18 copyright patents of the Russian Federation. E-mail: BelavskayaSV@gmail.com

Lisitsyna Liliya I., D. Sc. (Eng.), professor at the Department of Electronic Devices in Novosibirsk State Technical University. The main field of her scientific research is the development of diagnostic devices and the study of biophysical processes. She has more than 500 scientific publications, including 40 copyright certificates and patents of the Russian Federation. E-mail: lisitcinali@gmail.com

Razinkin Vladimir P., D. Sc. (Eng.), associate professor in Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is a wide range microwave device of a high power level. He has more than 160 scientific publications, including 36 patents of the Russian Federation. E-mail: Razinkin@corp.nstu.ru

Vinskaya Ekaterina K., a 4th year student at the Faculty of Physics and Technology of Novosibirsk State Technical University. She has been engaged in scientific research for 2 years in the field of developing a device for ablation of biological tissues. She has 3 scientific publications. E-mail: katerinavns@gmail.com

Khrustalev Vladimir A., D.Sc. (Eng.), associate professor in Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is a wide range microwave device of a high power level. He has more than 180 scientific publications, including 43 patents of the Russian Federation. E-mail: VA_Khrustalev@ngs.ru

Kuzmin Anton N. Master of Engineering and Technology, the 1st category engineer of “VERSET”, LLC. The main field of his scientific research is the development of medical devices and study of biophysical processes. He has more than 40 scientific publications, including 1 patent of the Russian Federation. E-mail: anton@kuz-min.ru

Markov Artyom V., senior lecturer at the Department of Electronic Devices in Novosibirsk State Technical University, Director of the engineering company "332LAB", a responsible performer of more than 15 R&D projects. He is the author of 26 scientific publications. E-mail: avm@332lab.ru.

An electromagnetic system for the destruction of biological tissues at a frequency of 27.12 MHz *

S.V. BELAVSKAYA^a, L.I. LISITSYNA^b, V.P. RAZINKIN^c, E.K. VINSKAYA^d,
V.A. KHRUSTALEV^e, A.N. KUZMIN^f, A.V. MARKOV^g

Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a Svetlana.belana@yandex.ru ^b lisitcinali@gmail.com ^c razinkin_vp@mail.ru

^d katerinavns@gmail.com ^e va_khrustalev@ngs.ru ^f anton@kuz-min.ru

^g markovav@corp.nstu.ru

Abstract

The results of a study of the destruction of biological tissues by high-frequency electromagnetic radiation at an allowed frequency of 27.12 MHz are presented in comparison with destruction also at an allowed frequency of 13.56 MHz with the same power of the acting radiation of 30 W. Today, all known devices for high-frequency electromagnetic destruction at a frequency of 27.12 MHz are used for superficial shallow operations (removal of papillomas, moles, etc.). The development of a high-frequency electromagnetic system for the destruction of deep, dense tissues (bone, cartilage), as well as malignant neoplasms at the indicated frequency, is the most urgent task of our time. To conduct research at the indicated frequency, an experimental setup was developed and implemented on a modern element base, a distinctive feature of which is ensuring stable and reliable operation of the used transistor power amplifiers while maintaining their performance in a wide range of load changes (from idle to short circuit). This feature is implemented through the use of a two-channel bridge amplifying path. To test the operability of the installation, a multimeter with a thermal imager function and an immittance meter were used. The form of the output signal of the installation is a sinusoid, the second harmonic is weakened in relation to the main one by 60 dB. The studies were carried out in vitro on biopsies of muscle, bone tissues and liver of cattle, as well as on pig skin. It is shown that cuts of a biological tissue made at a frequency of 27.12 MHz have deep coagulation, and at a frequency of 13.56 MHz, carbonization of muscle tissue is already observed at the site of coagulation; the destruction of a bone tissue and liver at a frequency of 27.12 MHz is more pronounced, at a frequency of 13.56 MHz, elements of carbonization appear in the area of destruction. The exposure to high-frequency radiation at a frequency of 27.12 MHz occurs with a smaller effect on surrounding tissues than at a frequency of 13.56 MHz. Punctures of muscle tissue and liver performed at various frequencies practically do not differ; the temperature in the electric discharge region, which occurs at a frequency of 27.12 MHz at a radiation power of 30 W, is above 150 °C (at a frequency of 13.56 MHz the temperature is 126 °C). However, the temperature in the discharge region at a frequency of 27.12 MHz can be reduced to the same temperature as at a frequency of 13.56 MHz by reducing the power of electromagnetic radiation by a factor of 1.5.

Keywords: biological tissue, destruction, discharge, high-frequency, ablation, 27.12 MHz, coagulation, carbonization, temperature, second harmonic

REFERENCES

1. Moskvicheva L.I., Sidorov D.V., Lozhkin M.V., Petrov L.O., Zabelin M.V. Sovremennyye metody ablyatsii zlokachestvennykh novoobrazovaniy pecheni [Modern methods of ablation of malignant tumors of the liver]. *Issledovaniya i praktika v meditsine = Research 'n Practical Medicine Journal*, 2018, vol. 5, no. 4, pp. 58–71.

* Received 13 February 2023.

2. Sidorov D.V., Grishin N.A., Lozhkin M.V., Vishnevskiy V.A., Petrov L.O. Novyi metod mikrovolnovoi ablyatsii zlokachestvennykh novoobrazovaniy pecheni [A new method of microwave ablation of malignant hepatic tumors]. *Onkokhirurgiya = Oncosurgery*, 2012, vol. 4, no. 1, p. 50.
3. Sidorov D.V., Stepanov S.O., Grishin N.A., Lozhkin M.V., Petrov L.O., Mainovska O.A. Mikrovolnovaya ablyatsiya pri lechenii zlokachestvennykh novoobrazovaniy pecheni [Microwave ablation for the treatment of malignant liver tumors]. *Onkologiya. Zhurnal im. P.A. Gertsena = P.A. Herzen Journal of Oncology*, 2013, no. 2, pp. 27–31.
4. Zhao J., Li Q., Mukhtali M., Ren B., Hu Y., Li D., Li Z., Li D., Xie Y., Tao M., Liang R. Effect of microwave ablation treatment of hepatic malignancies on serum cytokine levels. *BMC Cancer*, 2020, vol. 20, p. 812.
5. Petrenko N.N., Barsukova Ye.O., Polischuk L.O., Fisenko Ye.P., Shatveryan G.A., Skipenko O.G. Rezul'taty radiochastotnoi ablyatsii pri lechenii kolorektal'nykh metastazov v pecheni [Results of radio-frequency ablation of colorectal cancer metastases in the liver]. *Rossiiskii zhurnal gastroenterologii, gepatologii, koloproktologii = Russian Journal of Gastroenterology, Hepatology, Coloproctology*, 2007, vol. 17, no. 3, pp. 84–89.
6. Fedorov V.D., Vishnevskiy V.A., Kubyshkin V.A., et al. Ispol'zovanie apparata radiochastotnoi ablyatsii pri rezeksii pecheni [The use of radiofrequency ablation apparatus for liver resection]. *Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova = Pirogov Russian Journal of Surgery*, 2004, no. 5, pp. 21–25.
7. Boutros C., Somasundar P., Garrean S., Saied A., Espot N.J. Microwave coagulation therapy for hepatic tumors: review of the literature and critical analysis. *Surgical Oncology*, 2010, vol. 19 (1), pp. e22–e32.
8. Kulaylat M.N., Gibbs J.F. Thermoablation of colorectal liver metastasis. *Journal of Surgical Oncology*, 2010, vol. 101 (8), pp. 699–705.
9. Lencioni R.A., Allgaier H.P., Cioni D., Olschewski M., Deibert P., Crocetti L., Frings H., Laubenberger J., Zuber I., Blum H.E., Bartolozzi C. Small hepatocellular carcinoma in cirrhosis: randomized comparison of radio-frequency thermal ablation versus percutaneous ethanol injection. *Radiology*, 2003, vol. 228 (1), pp. 235–240.
10. Razafindratsira T., Isambert M., Evrard S. Complications of intraoperative radiofrequency ablation of liver metastases. *HPB (Oxford)*, 2011, vol. 13 (1), pp. 15–23.
11. Trandofilov M.M., Rudakova M.N., Ryabov K.Yu., Shershnev O.F., Prokhorov A.V. Mikrovolnovaya ablyatsiya v kombinirovannom lechenii pervichnykh opukholei i metastazov pecheni [Microwave ablation in combined treatment of primary and metastatic liver tumors]. *Annaly khirurgicheskoi gepatologii = Annals of HPB Surgery*, 2015, vol. 20 (4), pp. 34–39. DOI: 10.16931/1995-5464.2015434-39.
12. Balakhnin P.V., Shmelev A.S., Shachinov E.G. Chreskozhnaya energeticheskaya ablyatsiya opukholei: printsipy, tekhnologii, rezul'taty [Percutaneous energy ablation of tumors: principles, technologies, results]. *Prakticheskaya onkologiya = Practical Oncology*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 129–153.
13. Ahmed M., Brace C.L., Lee F.T. Jr, Goldberg S.N. Principles of and advances in percutaneous ablation. *Radiology*, 2011, vol. 258, no. 2, pp. 351–369.
14. Topuzov E.E., Bobrakov M.A., Balashov V.K., Drogomiretskaya E.I., Erokhina E.A., Kislitsina O.N., Petryashov A.N., Kruglov A.N., Topuzov R.E., Napolskaya E.V. Radiochastotnaya ablyatsiya kak vspomogatel'nyi i okonchatel'nyi metod lecheniya metastaticheskogo porazheniya pecheni u bol'nykh kolorektal'nym rakom [Radiofrequency ablation as an auxiliary and final method of treatment of metastatic liver damage in patients with colorectal cancer]. *Vestnik Severo-Zapadnogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta im. I.I. Mechnikova = Herald of the Northwestern State Medical University named after I.I. Mechnikov*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 7–14.
15. Ardashev A.V., Zhelyakov E.G., Dolgushina E.A., Rybatchenko M.S., Mangutov D.A., Konev A.V., Voloshko S.V., Vrublevsky O.Yu., Kryuchko M.V., Liventseva E.N. Radiochastotnaya kateternaya ablyatsiya khronicheskoi formy fibrillyatsii predserdii metodom izolyatsii legochnykh ven i anatomicheskoi modifikatsii substrata aritmii [Radiofrequency ablation of chronic atrial fibrillation by combined isolation of pulmonary veins and anatomical modification of substrate of arrhythmia]. *Kardiologiya = Cardiology*, 2008, no. 12, pp. 41–48.
16. Gvozdev M.A., Ryabinin M.V., Saprykin A.S., Kornilov N.N. Istoriya razvitiya radiochastotnoi ablyatsii v travmatologii i ortopedii [History of development of radiofrequency ablation in traumatology and orthopedics]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*, 2021, no. 1. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=30460> (accessed 30.08.2023).
17. Tikhonov V.N. Mini-svin'i – nadezhda chelovechestva [Mini-pigs – the hope of mankind]. *Khimiya i zhizn' – XXI vek = Chemistry and Life – 21st Century*, 2011, no. 9, pp. 32–36.

18. Vinskaya E.K., Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I. [Laser control of destruction degree of biological tissue]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Innovations]. 16 All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Novosibirsk, 5–8 Dec. of 2022. In 11 pt. Pt. 6, pp. 119–123. (In Russian).

19. Lisitsyna L.I., Belavskaya S.V., Kuzmin A.N., Vinskaya E.K. [Ablation of bone tissue performed by exposure to high-frequency electromagnetic radiation]. *Sovremennye problemy telekommunikatsii* [Modern problems of telecommunications]. Materials of the Russian Scientific and Technical conference, Novosibirsk, 20–21 April 2022, pp. 648–652. (In Russian).

20. Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I., Kuzmin A.N., Vinskaya E.K. Comparative analysis of soft biological tissue ablation characteristics obtained by electromagnetic radiation of HF and UHF ranges. *IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*: proceedings, Erlagol, 30 June – 4 July 2022. IEEE, 2022, pp. 510–513.

21. Lisitsyna L.I., Belavskaya S.V., Blokhin A.A. Utilization of high frequency electrical signal for biological tissue ablation. *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2021)*: proceedings, Novosibirsk, 19–21 Nov. 2021, pp. 72–75.

22. Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I., Kuzmin A.N., Vinskaya E.K., Navrotsky L.D., Razinkin V.P., Blokhin A.A. Vysokochastotnaya elektromagnitnaya sistema dlya destruktzii biologicheskikh tkanei [A high-frequency electromagnetic system for biological tissues destruction]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 1 (89), pp. 55–80. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-55-80.

23. Lasmed Clinic. *Lazernoe ili radiovolnovoe udalenie novoobrazovaniy* [Laser or radio wave removal of neoplasms]. (In Russian). Available at: <https://lasmed.ru/posts/745/> (accessed 30.08.2023).

Для цитирования:

Электромагнитная система для деструкции биологических тканей на частоте 27,12 МГц / С.В. Белавская, Л.И. Лисицына, В.П. Разинкин, Е.К. Винская, В.А. Хрусталёв, А.Н. Кузьмин, А.В. Марков // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 105–120. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-105-120.

For citation:

Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I., Razinkin V.P., Vinskaya E.K., Khrustalev V.A., Kuzmin A.N., Markov A.V. Elektromagnitnaya sistema dlya destruktzii biologicheskikh tkanei na chastote 27,12 MGts [An electromagnetic system for the destruction of biological tissues at a frequency of 27.12 MHz]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 3 (91), pp. 105–120. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-105-120.