

ТЕРМОЭЛАСТИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В БИОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КРАЙНЕ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ С БОЛЬШОЙ ПИКОВОЙ МОЩНОСТЬЮ

© 2007 г. А.Б. Гапеев, А.В. Рубаник*, Т.Н. Пашовкин, Н.К. Чемерис

Институт биофизики клетки РАН, 142290, Пущино Московской области;

** Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 220027, г. Минск, Республика Беларусь*

Поступила в редакцию 08.11.06 г.

Впервые экспериментально продемонстрирована возможность термоэластического возбуждения акустических волн в модельных водосодержащих объектах и мышечной ткани животного под действием импульсного электромагнитного излучения крайне высокой частоты с большой пиковой мощностью (35,27 ГГц, длительность импульсов 100 и 600 нс, импульсная мощность 20 кВт). Амплитуда и длительность возбужденных акустических импульсов находятся в пределах точности теоретических оценок и имеют сложную нелинейную зависимость от подводимой энергии электромагнитного излучения. Скорости распространения акустических импульсов в водно-желатиновых моделях и изолированной мышечной ткани животного близки к справочным. Возбуждение акустических колебаний в биологических системах под действием импульсного электромагнитного излучения крайне высокой частоты с большой пиковой мощностью является важным феноменом, вносящим существенный вклад в понимание механизмов биологического действия таких излучений.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное излучение крайне высокой частоты с большой пиковой мощностью, термоэластическое возбуждение акустических колебаний.

Преобразование электромагнитной энергии в энергию акустических колебаний хорошо известно, например, при действии импульсного лазерного излучения на различные среды [1-3], и широко применяется в лазерной оптико-акустической интроскопии, микроскопии и спектроскопии. Вполне вероятно, что под действием импульсных электромагнитных излучений (ИЭМИ) сверх и крайне высоких частот (СВЧ и КВЧ) может наблюдаться аналогичный эффект в средах с высоким поглощением ЭМИ [4]. При этом важную роль играют параметры электромагнитного сигнала, такие как длительность импульса и импульсная мощность. Индукция акустических колебаний в водосодержащих биологических средах под действием ИЭМИ СВЧ (1245 и 2450 МГц, 2-30 мкс) была зарегистрирована многими авторами [5-9] – так называемые "слуховые эффекты". Однако термоэластического возбуждения акустических волн под действием ИЭМИ КВЧ с большой пиковой мощностью (ИЭМИ КВЧ БПМ)

до сих пор зарегистрировано не было. Электромагнитное возбуждение акустических волн в среде под действием ИЭМИ КВЧ БПМ возможно за счет квадратично-нелинейных по амплитуде электромагнитного поля механизмов. В этом случае акустические колебания возбуждаются не на частоте электромагнитной волны, а на частоте модуляции интенсивности, которая попадает в акустический диапазон. Поскольку ЭМИ КВЧ эффективно поглощается в поверхностных слоях водосодержащих объектов и поглощенная энергия трансформируется в тепло, основная роль отводится тепловому механизму возбуждения акустических волн.

При поглощении импульса ЭМИ КВЧ в сильно поглощающей среде происходит неоднородный нестационарный нагрев поверхностного слоя [10]. Если за время действия импульса тепло диффундирует на расстояние, не превышающее глубины проникновения ЭМИ в среду, то диффузия тепла не оказывает влияния на распределение температуры в среде. Это температурное поле вызывает механические напряжения, которые индуцируют импульсы продольных акустических волн, распространяющиеся вглубь поглощающей среды. Амплитуда

Сокращения: ИЭМИ – импульсное электромагнитное излучение, СВЧ и КВЧ – сверх и крайне высокие частоты, БПМ – большая пиковая мощность.

и временная форма возбуждаемого ультразвукового импульса в общем случае определяются временной зависимостью интенсивности поглощенного импульса ЭМИ и теплофизическими параметрами среды (коэффициентом поглощения, коэффициентом теплового расширения, теплоемкостью, плотностью и теплопроводностью).

На основе регистрации термоупругих колебаний, вызванных поглощением модулированного (меандр с частотами 2-1000 Гц) ЭМИ КВЧ, в 1987 г. был разработан метод акустического детектирования поглощенной мощности [11]. Однако этот метод не нашел широкого применения в экспериментальной практике, поскольку он не позволяет корректно определять пространственное распределение температуры в облучаемом ЭМИ КВЧ объекте. Время пробега звука (порядка 300 нс) по области тепловыделения (порядка 0,5 мм) оказывается значительно меньше длительности электромагнитного импульса 500 мкс (при частоте модуляции 1 кГц). Поэтому возникающие механические напряжения успевают релаксировать за время действия импульса ЭМИ КВЧ. Попытка применить аналогичный подход с целью использования термоакустического эффекта для разработки новых детекторов ИЭМИ КВЧ БПМ с крайне короткой длительностью (37 ГГц, длительность импульса около 5 нс, импульсная мощность около 5 МВт) также не увенчалась успехом [12]. Авторам работы [12] не удалось зарегистрировать акустический импульс, возбуждаемый импульсом ЭМИ КВЧ, ни в алюминии, ни в ртути, ни в водной среде, т.к. на момент ожидаемого появления акустического импульса возникающая импульсная электромагнитная наводка на регистрирующую аппаратуру в несколько раз превышала предполагаемую амплитуду акустического сигнала.

Ранее мы косвенно показали, что ИЭМИ КВЧ БПМ может возбуждать в водных растворах термоакустические колебания с амплитудами, достаточными для образования активных форм кислорода [13]. Целью настоящей работы являлась прямая экспериментальная демонстрация принципиальной возможности возбуждения термоакустических волн под действием ИЭМИ КВЧ БПМ в модельных водосодержащих объектах и мышечной ткани животного.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве модельных объектов использовались водно-желатиновые смеси, приготовленные на фосфатно-солевом буфере (в мМ: 136,7 NaCl, 2,7 KCl, 8,1 Na₂HPO₄, 1,5 KH₂PO₄; pH 7,0) с содержанием 25% желатина. Из водно-

желатиновых смесей были приготовлены образцы в форме параллелепипедов длиной 25 мм, шириной 15 мм и высотой от 6 до 32 мм. Из мышечных тканей животных готовили образцы в форме параллелепипеда длиной 30 мм, шириной 15 мм и высотой 17,5 мм.

Для облучения объектов использовали магнетронный генератор ИЭМИ КВЧ БПМ со следующими параметрами: рабочая частота 35,27 ГГц (длина волны 8,5 мм), выходная импульсная мощность 20 ± 5 кВт, длительность импульсов 100 ± 10 и 600 ± 60 нс. В качестве излучателя использовали открытый отрезок волновода сечением $7,2 \times 3,4$ мм² со стандартным фланцем.

Регистрация и визуализация возбужденной акустической волны производилась с помощью аппаратно-программного комплекса в составе: 1) широкополосный датчик акустических колебаний на основе пленки ПВДФ (поливинил-иденфторид) с чувствительностью 200 мВ/бар (тип LDTI-028K, производство США) и размерами 27×12 мм; 2) широкополосный усилитель (0,2 – 2,2 МГц) с коэффициентом усиления до 60 дБ; 3) цифровой осциллограф ADCLab ("Руднев Шилаев, ЗАО", Россия) на основе быстродействующей платы аналого-цифрового преобразователя типа LA-n10M7PCI с частотой дискретизации до 100 МГц. Для синхронной регистрации акустического сигнала в момент генерации импульса ЭМИ КВЧ на осциллограф подавали синхронизирующий импульс от блока управления генератором. С этого момента начиналась запись сигнала с акустического детектора.

Модельные объекты (водно-желатиновые образцы и образцы мышечных тканей животных) помещали непосредственно на фланец волновода, герметично закрытый эластичной пленкой типа "Парафилм", прозрачной для ЭМИ КВЧ. Излучение было направлено снизу вверх. Специальных средств для согласования излучения с объектом не применяли, поэтому при нормальном падении излучения на объект коэффициент отражения составлял около 0,47. Детектор акустических колебаний (5) вводили в акустический контакт с исследуемым объектом (3) (рис. 1). На детектор помещали водно-желатиновый образец (4) высотой 6 мм для улучшения согласования детектор-образец, а также регистрации акустической волны, отраженной от границы раздела желатин-воздух. Весь комплекс - облучаемый объект, детектор и усилитель - помещали в двухконтурную экранированную заземленную камеру, имеющую входы для акустического датчика (5) и волновода (2).

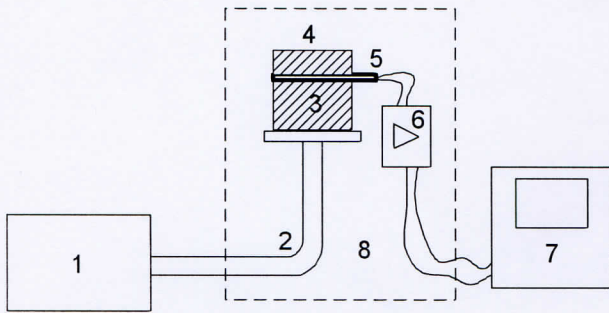


Рис. 1. Блок-схема стенда для термоэластического возбуждения и регистрации акустических волн в модельных биологических объектах: 1 – магнетронный генератор; 2 – волноводный тракт; 3 – объект; 4 – водно-желатиновый образец толщиной 6 мм; 5 – акустический детектор; 6 – усилитель; 7 – цифровой осциллограф; 8 – экранированная камера.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате экспериментов по стыковке излучающей и регистрирующей аппаратуры было обнаружено, что в момент генерации импульса ЭМИ КВЧ возникает мощная электромагнитная наводка на регистрирующую аппаратуру. Устранить или значительно уменьшить эту электромагнитную наводку не удалось. Регистрация возбужденного акустического сигнала в облучаемом объекте оказалась возможной только по истечении времени релаксации переходного процесса, вызываемого электромагнитной наводкой, которое составило около 8 мкс. Учитывая скорость распространения звука в воде приблизительно равной 1500 м/с, за время 8 мкс фронт акустической волны может распространиться на расстояние 12 мм. Таким образом, было установлено, что толщина облучаемого объекта должна составлять не менее 12 мм для обеспечения надежного детектирования полезного сигнала на фоне помех от сильноточных устройств излучателя ИЭМИ КВЧ.

Максимальное давление в термоакустическом импульсе может быть оценено с учетом свойств поглощающей среды и количества поглощенной энергии ЭМИ [4, 12]:

$$p_{ac} = \frac{\beta c_0^2 \alpha E (1-R)}{2C_p}, \quad (1)$$

где температурный коэффициент объемного расширения для воды при комнатной температуре $\beta \approx 2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, скорость звука в поглощающей среде $c_0 \approx 1500 \text{ м/с}$, коэффициент поглощения излучения $\alpha \approx 10^3 \text{ м}^{-1}$, удельная теплоемкость поглощающей среды $C_p \approx 4200 \text{ Дж/(кг K)}$, поверхностная плотность энергии

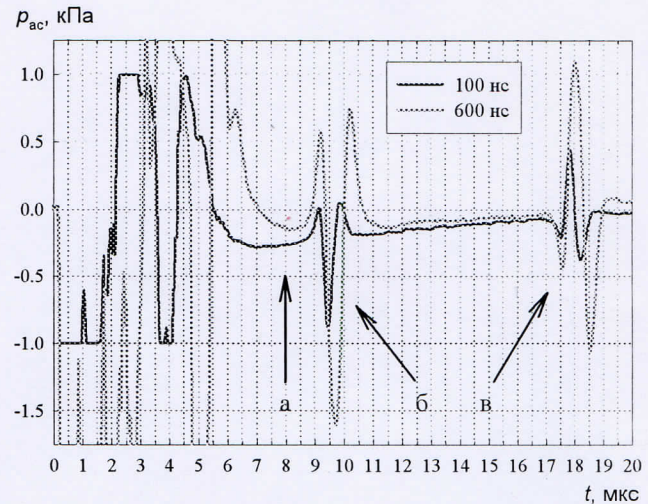


Рис. 2. Пример регистрации сигналов с акустического детектора (p_{ac}) в водно-желатиновой модели толщиной 13 мм, облучаемой ИЭМИ КВЧ БПМ (35,27 ГГц, длительности импульсов 100 и 600 нс, импульсная мощность 20 кВт). t – время с момента генерации импульса ЭМИ КВЧ. Для каждой регистрации проведено усреднение по 5 последовательным трекам. a – время окончания действия импульсной наводки, b – прямой акустический импульс, распространяющийся от зоны возбуждения ИЭМИ КВЧ БПМ до акустического детектора (5), $в$ – акустический импульс, отраженный от границы раздела водно-желатиновый образец (4) – воздух и вернувшийся на акустический детектор (5).

излучения на границе поглощающей среды $E \approx 80 \text{ Дж/м}^2$ (при длительности импульса ЭМИ КВЧ 100 нс, импульсной мощности 20 кВт, площади облучаемой поверхности около 25 мм^2), коэффициент отражения $R \approx 0,47$. По нашим оценкам максимальное давление в термоакустическом импульсе может составлять около 2 кПа. При коэффициенте преобразования акустического датчика 1 кПа \rightarrow 2 мВ ожидаемый максимальный сигнал на входе системы регистрации не должен превышать 4 мВ. При указанных параметрах ИЭМИ КВЧ БПМ мы зарегистрировали акустический импульс, возбужденный в водно-желатиновых образцах, с амплитудой порядка 1,8 мВ (приведенной ко входу усилителя), т.е. около 1 кПа, что в два раза меньше по сравнению с теоретическими оценками. При длительности импульса ЭМИ КВЧ 600 нс ($E \approx 480 \text{ Дж/м}^2$) размах амплитуды акустического импульса достигал 4,5 мВ, т.е. более 2 кПа (рис. 2). Проверка результатов регистрации акустического сигнала на отсутствие возможных артефактов показала, что акустический сигнал не визуализируется на осциллографе при отсутствии мощности ЭМИ КВЧ при всей включенной аппаратуре, а также акустический сигнал не регистрируется при разрыве акустического контакта между облучаемым

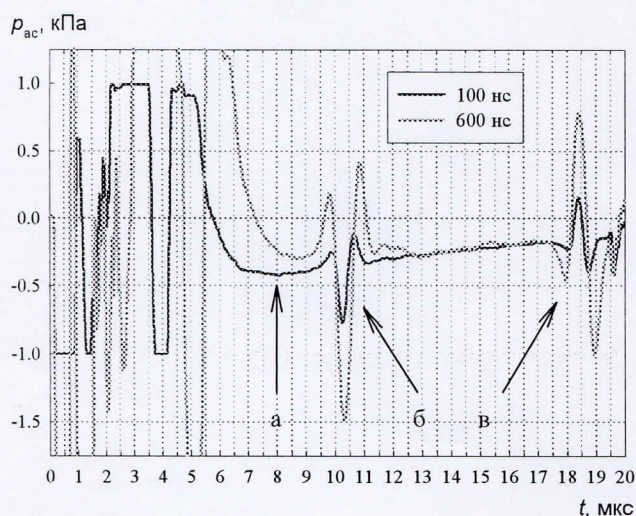


Рис. 3. Пример регистрации сигналов с акустического детектора (p_{ac}) в образце мышечной ткани толщиной 17,5 мм, облучаемой ИЭМИ КВЧ БПМ (35,27 ГГц, длительности импульсов 100 и 600 нс, импульсная мощность 20 кВт). t – время с момента генерации импульса ЭМИ КВЧ. Для каждой регистрации проведено усреднение по 5 последовательным трекам. *а* – время окончания действия импульсной наводки, *б* – прямой акустический импульс, *в* – акустический импульс, отраженный от границы раздела водно-желатиновый образец (4) – воздух и вернувшийся на акустический детектор (5).

объектом и акустическим детектором при сохранении сигнала от электромагнитной помехи.

Амплитуда зарегистрированного акустического импульса имеет сложную нелинейную зависимость от подводимой энергии ЭМИ КВЧ, что было проверено при возбуждении акустических импульсов при фиксированной импульсной мощности ЭМИ КВЧ (20 кВт) и длительности импульсов 100 и 600 нс (рис. 2). Нелинейная зависимость между подводимой к образцу электромагнитной энергией и амплитудой возбуждаемого акустического сигнала может быть связана с особенностями формирования временной формы акустического импульса и фронта акустической волны. При длительности импульса ИЭМИ КВЧ 100 нс возбуждаемая акустическая волна пробегает расстояние около 0,15 мм, что примерно в три раза меньше глубины скин слоя (около 0,5 мм при частоте 35 ГГц). В этом случае основная часть энергии ЭМИ КВЧ преобразуется в энергию акустической волны и длительность акустического импульса определяется коэффициентом поглощения электромагнитной энергии [2]. При длительности импульса ИЭМИ КВЧ 600 нс возбуждаемая акустическая волна пробегает расстояние около 0,9 мм, что почти в два раза больше глубины скин слоя. В этом случае

временная форма акустического импульса определяется, в основном, формой импульса ЭМИ КВЧ [12], и при этом увеличиваются потери на генерацию и рассеяние акустических волн. Следует учитывать, что речь идет о качественном, а не о количественном сравнении теоретических оценок и экспериментальных результатов, поскольку как теория, так и эксперимент требуют дальнейшей оптимизации. Дополнительные погрешности теоретических расчетов связаны с точностью определения коэффициента поглощения ЭМИ КВЧ для используемых сред, а также зависимости вязкости и упругих свойств среды от частоты акустических колебаний.

Амплитуда и форма акустического импульса, возбуждаемого в мышечной ткани животного, мало отличаются от таковых в водно-желатиновом образце (рис. 2 и 3), что свидетельствует о близких характеристиках поглощающих сред.

Мы оценили скорости распространения возбужденного акустического импульса в модельных объектах (водно-желатиновые смеси и образцы мышечных тканей животных) при различной толщине облучаемых объектов. В водно-желатиновых образцах расчетная скорость акустической волны составила 1494 м/с при толщине образца 13 мм, 1504 м/с при толщине образца 17,3 мм и 1533 м/с при толщине образца 25,3 мм. Средняя скорость распространения акустического импульса в водно-желатиновых моделях составила 1510 ± 10 м/с, что близко к справочным данным. В образцах мышечных тканей, облучаемых вдоль волокон, скорость акустической волны несколько превышает справочные данные, а в облучаемых поперек волокон, практически совпадает со справочными данными и составляет около 1590 м/с [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нам удалось экспериментально зарегистрировать факт, что ИЭМИ КВЧ БПМ возбуждает акустический импульс, распространяющийся в водно-желатиновых моделях и мышечных тканях животных. При возбуждении акустического импульса ИЭМИ КВЧ с частотой 35 ГГц амплитуда и длительность акустического импульса находятся в пределах точности теоретических оценок. Форма и амплитуда возбужденного акустического импульса имеют сложную нелинейную зависимость от подводимой энергии ЭМИ КВЧ. Для установления точного соответствия между теоретическими оценками и экспериментальными результатами необходимы дальнейшие разработка теории возбуждения акустических волн под действием ИЭМИ радиочастотного диапазона и оптимизация эксперимента. Скорости распространения акустических

импульсов в водно-желатиновых моделях и мышечной ткани животного близки к справочным.

Возбуждение акустических колебаний в биологических системах под действием ИЭМИ КВЧ БПМ является важным феноменом, вносящим существенный вклад в механизмы биологического действия таких излучений (наряду с тепловыми эффектами). Нами обнаружена генерация перекиси водорода в наномолярных концентрациях (8 - 94 нМ) при облучении водных растворов ИЭМИ КВЧ БПМ (35 ГГц, длительность импульса 400 - 600 нс, импульсная мощность 20 кВт, длительность экспозиции 10 мин), которая происходит в результате суммарного влияния тепла и возбуждаемых в растворе термоакустических колебаний [13]. Не исключено, что ряд биологических эффектов импульсных микроволн, таких как изменение уровня синтеза ДНК и РНК в опухолевых клетках, изменение биохимических показателей крови животных и др. [15-17], обусловлены инициацией свободнорадикальных окислительных процессов под действием возбуждаемых акустических волн. Показано, что ультразвук низких интенсивностей может влиять на активность ферментов в тканях [18], процессы ионного транспорта через мембраны клеток [19], подавлять или активировать жизнеспособность целостных живых систем, например, зародышей амфибий [20]. При воздействии модулированного ИЭМИ КВЧ БПМ на целостный организм возможен сложный характер взаимодействия за счет генерации акустических волн со сложным спектром частотной модуляции. Поиск ключевых мишеней и определение спектра эффективных частот модуляции ИЭМИ КВЧ БПМ является перспективной задачей дальнейших исследований.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-04-81034_Бел_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Rozenzwaig, Adv. Electron. Phys. **46**, 207 (1978).
2. Z. Shen, S. Zhang, and J. Cheng, Analytical Sciences **17**, s204 (2001).
3. V.G. Andreev, A.A. Karabutov, and A.A. Oraevsky, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. **50**, 1383 (2003).
4. K.R. Foster, and E.D. Finch, Science **185**, 256 (1974).
5. J.C. Lin, *Microwave Auditory Effects and Applications*, Ed. C.C. Thomas (Springfield, Illinois, USA, 1978).
6. R.G. Olsen and J.C. Lin, IEEE Trans. Biomed. Eng. **30**, 289 (1983).
7. J.C. Lin, in: *Biological Effects and Medical Applications of Electromagnetic Fields*, Ed. O.P. Gandhi (Prentice-Hall, New York, USA, 1990). Chapter 12. pp. 277-318.
8. Р.Э. Тигрянян и В.В. Шорохов, *Физические основы слухового эффекта СВЧ* (ОНИИ Пушинского научного центра АН СССР, Пушкино, 1990).
9. J.C. Lin, IEEE Trans. Microwave Theory Techn. **MTT-25**, 605 (1997).
10. М.Л. Ряковская, В.М. Штемлер и А.Н. Кузнецов, Деп. рук. ВИНТИ, № 801 (М., 1983).
11. И.Г. Полников и А.В. Путвинский, Биофизика. **33** (5), 893 (1988).
12. В.Г. Андреев, А.А. Карабутов и В.А. Вдовин, Вопросы атомной науки и техники № 5, 24 (2001).
13. О.Ю. Гудкова, С.В. Гудков, А.Б. Гапеев и др., Биофизика **50** (5), 773 (2005).
14. Б.В. Акопян и Ю.А. Ершов, *Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами: Ультразвук и медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии*, Под ред. С.И. Щукина (Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2005).
15. М.А. Большаков, С.П. Бугаев, А.О. Гончарик и др., Докл. АН **371** (5), 691 (2000).
16. Н.В. Литвяков, М.А. Булдаков, Н.В. Чердынцева и др., Радиационная биология. Радиоэкология **45** (4), 460 (2005).
17. М.А. Большаков, И.Р. Князева, В.В. Ростов и др., Биофизика (в печати).
18. E.P. Chetverikova, T.N. Pashovkin, N.A. Rozanova, et al., Ultrasonics **23** (4), 183 (1985).
19. T.N. Pashovkin and P.A. Grigoriev, J. Biol. Phys. Chem. **5**, 141 (2005).
20. В.К. Утешев, Т.Н. Пашовкин, А.Н. Севиров и др., Биофизика **51** (3), 539 (2006).

Thermoelastic Excitation of Acoustic Waves in Biological Models Under the Effect of High Peak-Power Pulsed Electromagnetic Radiation of Extremely High Frequency

A.B. Gapeyev, A.V. Rubanik*, T.N. Pashovkin, N.K. Chemeris

Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia

** Byelorussian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220027 Byelorussia*

The capability of high peak-power pulsed electromagnetic radiation of extremely high frequency (35,27 GHz, pulse widths of 100 and 600 ns, peak power of 20 kW) to excite acoustic waves in model water-containing objects and muscular tissue of animals has been experimentally shown for the first time. The amplitude and duration of the excited acoustic pulses are within the limits of accuracy of theoretical assessments and have a complex nonlinear dependence on the energy input of electromagnetic radiation supplied. The velocity of propagation of acoustic pulses in water-containing models and isolated muscular tissue of animals was close to the reference data. The excitation of acoustic waves in biological systems under the action of high peak-power pulsed electromagnetic radiation of extremely high frequency is the important phenomenon, which essentially contributes to the understanding of the mechanisms of biological effects of these electromagnetic fields.

Key words: high peak-power pulsed electromagnetic radiation of extremely high frequency, thermoelastic excitation of acoustic waves