

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ МИКРОБНЫХ КЛЕТОК

© 2019 г. С.Ф. Боев*, А.И. Вагин*, С.Ю. Соломатин*, Д.В. Савостьянов*, В.В. Силуянов*,
А.С. Шмаков*, Б.Д. Зайцев**, А.А. Теплых**, И.А. Бородина**,
О.А. Караваева***, О.И. Гулий*** ****

* Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, 127083, Москва, ул. 8 Марта, 10/5

** Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
410019, Саратов, ул. Зеленая, 38

*** Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН,
410049, Саратов, пр. Энтузиастов, 13

**** Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова,
410012, Саратов, Театральная пл., 1

E-mail: gulyi_olga@mail.ru

Поступила в редакцию 03.10.2018 г.

После доработки 07.12.2018 г.

Принята к публикации 04.02.2019 г.

Исследовано воздействие терагерцового импульсного излучения с длиной волны 66 мкм, длительностью импульса 100 нс и энергией импульса 200 мДж на суспензию микробных клеток. Установлено, что воздействие терагерцового излучения приводит к гибели клеток при определенном значении полной энергии, составляющем ~ 6 Дж. Поскольку температура суспензии клеток после облучения практически не изменялась, это означает, что импульсное воздействие терагерцового излучения имело нетепловой характер. Контроль результатов осуществлялся методами стандартного микробиологического посева, электронной микроскопии, электроакустического анализа и спектрального анализа. Полученные эксперименты открывают возможность регулировать жизнеспособность бактериальных клеток терагерцовым излучением с определенными параметрами.

Ключевые слова: жизнеспособность, электромагнитное излучение терагерцового диапазона, бактериофаги, *Escherichia coli*, электроакустический метод анализа.

DOI: 10.1134/S0006302919030141

В настоящее время исследование воздействия электромагнитного излучения терагерцового (ТГц) диапазона на биологические объекты является одним из актуальных научных направлений. Интерес к ТГц-излучению вызван тем, что оно характеризуется меньшим рассеянием в ряде материалов по сравнению с излучением видимого и инфракрасного диапазонов. Кроме того, именно ТГц-диапазону соответствуют ротационные и вибрационные энергетические уровни полярных молекул, включая ДНК и белки, а также фоновые резонансы кристаллических решеток, что позволяет развить новые методы спектроскопии биологических и полупроводниковых образцов, проводить идентификацию молекул. ТГц-излучение открывает широкие перспективы для

Сокращение: ТГц – терагерцовый.

применения в медицине, поскольку оно является неионизирующим и поглощается разными биологическими тканями с различной интенсивностью. В работе [1] показано, что ТГц-излучение весьма перспективно для разработки новых методов диагностики опухолей. Обнаружена корреляция результатов визуализации границ опухолей на образцах ткани слизистой рта при комнатной (20°C) и низкой (-20°C) температуре с результатами гистологического анализа [2].

В ряде работ выявлен эффект воздействия ТГц-излучения на биологические объекты, в экспериментах *in vivo* показано, что воздействие излучения с определенными частотами стимулирует заживление ожоговых ран [3].

Наиболее простым и удобным объектом для изучения воздействия ТГц-излучения на живые биообъекты являются бактерии *Escherichia coli*,

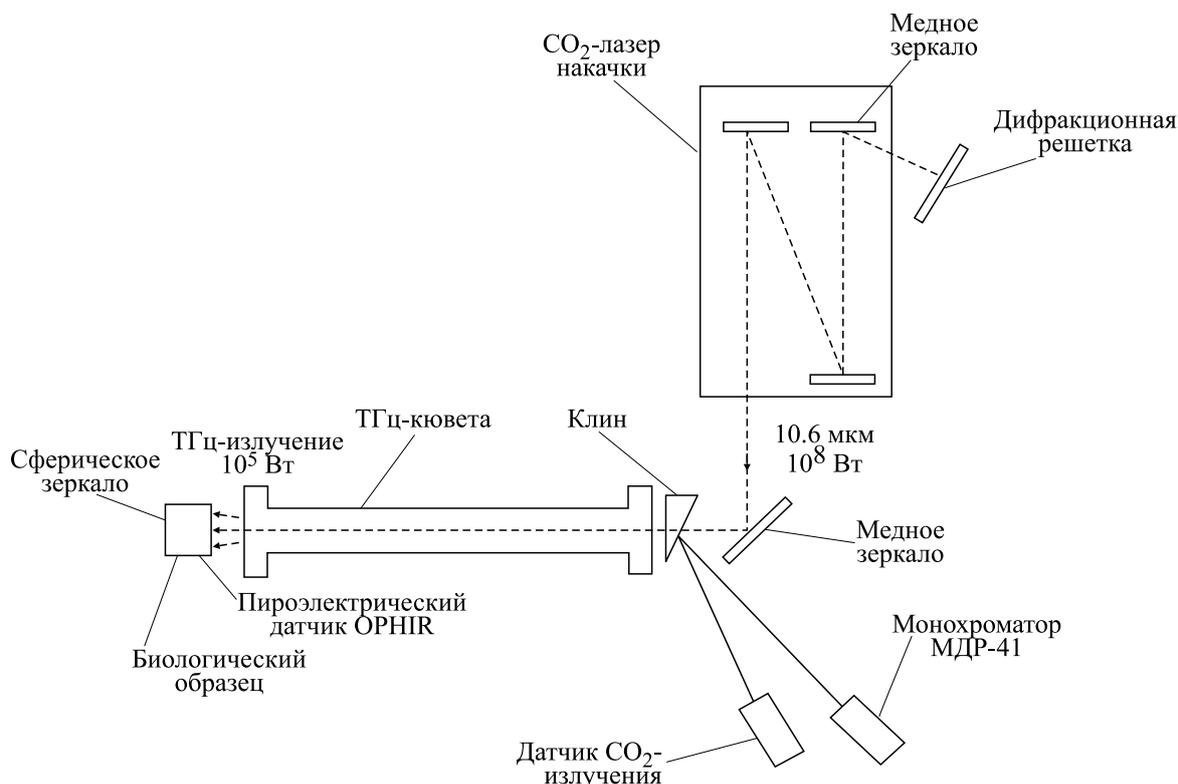


Рис. 1. Схема мощного терагерцового излучателя.

поскольку генетика, молекулярная биология и метаболизм этих бактерий хорошо изучены. Таким образом, целью настоящей работы являлось исследование воздействия импульсного ТГц-излучения на жизнеспособность микробных клеток.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Терагерцовый излучатель и методика облучения суспензии клеток. ТГц-излучатель (см. рис. 1)

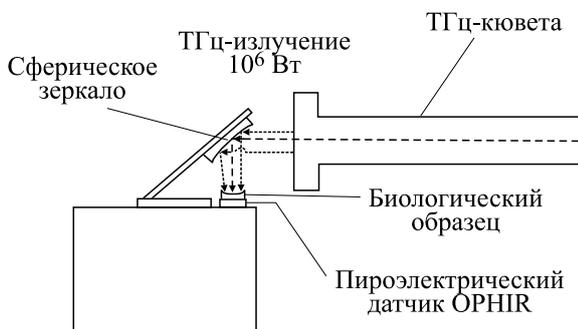


Рис. 2. Схема эксперимента облучения микробных клеток на мощном терагерцовом излучателе.

представляет собой двухкаскадный газовый ТГц-лазер с CO_2 -оптической накачкой.

ТГц-излучатель имеет следующие параметры: длина волны — 66 мкм; длительность импульса — 100 нс; энергия в импульсе — 200 мДж; частота повторения импульсов — 0,1 Гц; средняя мощность — 20 мВт.

Узел облучения терагерцовым излучением включает в себя (см. рис. 2): выходное окно, излучающее ТГц-излучение, медное сферическое зеркало диаметром 200 мм, тефлоновую чашку объемом 6 мл для клеточной суспензии и пироэлектрический датчик OPNIR, предназначенный для измерения энергии ТГц-излучения, прошедшего через образец. С помощью этого датчика экспериментально было установлено, что энергия импульса ТГц-излучения практически полностью поглощалась суспензией клеток.

Измерительная аппаратура. Определение жизнеспособности бактериальных клеток непосредственно в суспензиях проводили с помощью установки спектрального анализа материалов и акустического датчика на основе линии задержки с акустической SH_0 -волной.

Установка спектрального анализа материалов. Измерение коэффициента прохождения электромагнитного излучения через исследуемую су-

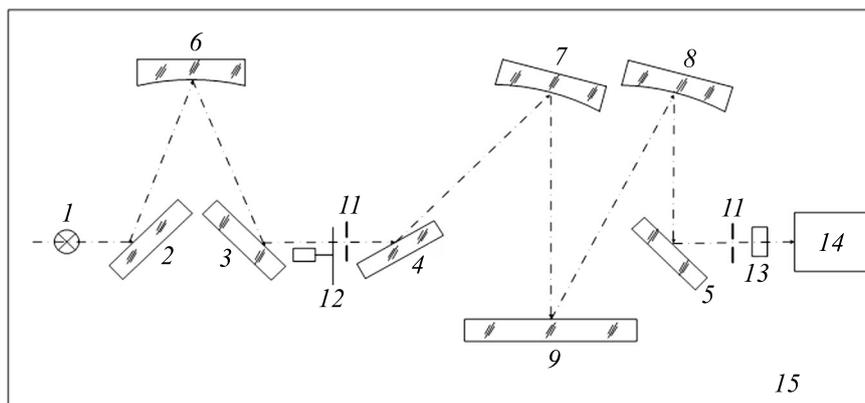


Рис. 3. Оптическая схема экспериментальной установки спектрального анализа: 1 – источник излучения, 2–5 – плоские зеркала, 6–8 – зеркальные сферические объективы, 9 – дифракционная решетка, 10 – входная регулируемая щель, 11 – выходная регулируемая щель, 12 – турель для автоматического переключения светофильтров с модулятором, 13 – объект исследования, 14 – приемник излучения, 15 – оптический стол.

пензию клеток проводили на стенде спектрального анализа материалов, схематически представленном на рис. 3.

Стенд включает в себя источник излучения (1), плоские зеркала (2–5), зеркальные сферические объективы (6–8), дифракционную решетку (9), входную регулируемую щель (10), выходную регулируемую щель (11), турель для автоматического переключения светофильтров с модулятором (12), объект исследования (13), приемник излучения (14) и оптический стол (15). Свет от источника излучения 1 направляется на сферическое зеркало 6, фокусирующее изображение источника излучения на входной щели 10 монохроматора. Поворотное зеркало 4 и зеркальный сферический объектив 7, в фокальной плоскости которого расположена входная щель, направляют свет на дифракционную решетку 9. После дифракции пучок лучей фокусируется зеркальным сферическим объективом 8 и направляется поворотным зеркалом 5 в плоскость выходной щели. Для подавления высших порядков спектра, наложенных на рабочую область, служат сменные светофильтры 12. Светофильтры предназначены для срезания высших порядков дифракции в следующих областях спектра: 0,36–0,60 мкм; 0,6–1,0 мкм; 1,0–1,5 мкм; 1,5–2,5 мкм; 2,5–3,2 мкм; 3,2–5,3 мкм. Применение различных приемников излучения 14 позволяло проводить исследования в спектральном диапазоне длин волн 0,2–25 мкм.

Датчик на основе линии задержки с акустической SH_0 -волной. Акустический датчик представлял собой линию задержки [4], изготовленную на основе пьезоэлектрической пластины $Y-X$ ниобата лития толщиной 0,2 мм (рис. 4). Контейнер заполняли исследуемой суспензией клеток и после

стабилизации выходной фазы и амплитуды (примерно 10 мин) добавляли порцию бактериофагов. Фаза и амплитуда выходного сигнала скачкообразно изменялись, если в суспензии присутствовали жизнеспособные клетки, причем величина скачка зависела от их количества. В результате были получены зависимости изменения фазы и полных потерь выходного сигнала от количества ТГц-импульсов, облучающих суспензию.

Биологические объекты исследований и их подготовка. *Культивирование микробных клеток и*

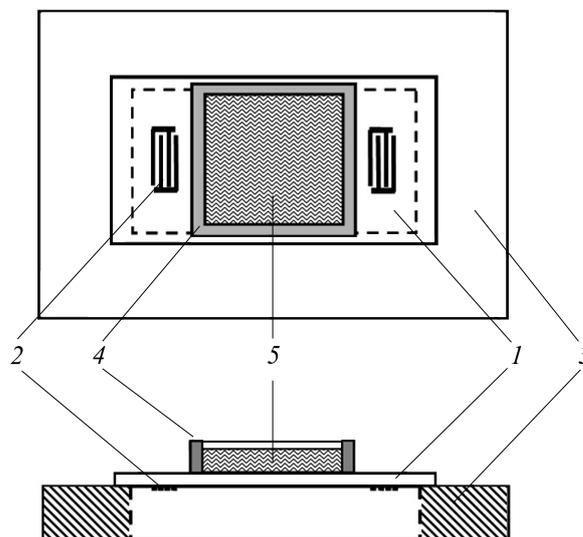


Рис. 4. Схема акустического биологического датчика на основе линии задержки: 1 – пластина $Y-X$ ниобата лития, 2 – встречно-штыревые преобразователи, 3 – держатель, 4 – жидкостной контейнер, 5 – исследуемая суспензия..

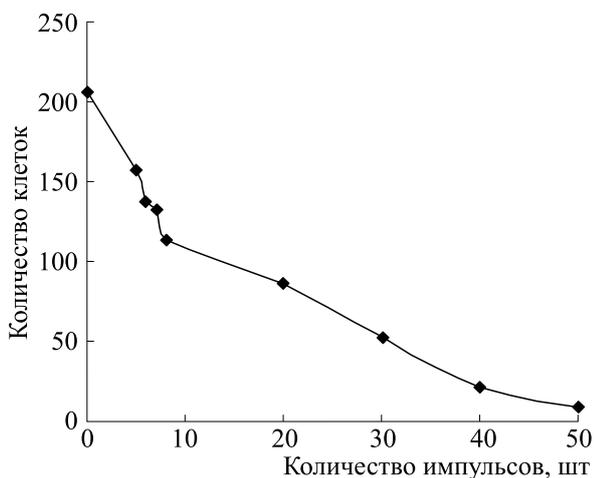


Рис. 5. График зависимости количества колоний клеток от числа импульсов ТГц-излучения.

определение их концентрации. В работе использовали микробные клетки *Escherichia coli* XL-1, полученные из коллекции ризосферных микроорганизмов Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН (ИБФРМ РАН, Саратов; <http://collection.ibppm.ru>). Для культивирования бактерий использовали стандартную процедуру, подробно описанную в работе [5]. Концентрацию микробных клеток определяли по величине оптической прозрачности D_{540} на приборе «Spocol-221» (ГДР) в кювете с толщиной оптического слоя 1,0 см и пересчитывали на вес сухих клеток (г/л) по предварительно построенным калибровочным кривым.

Определение жизнеспособности клеток микробиологическим методом. Для определения жизнеспособности облученных клеток использовали стандартный метод посева на поверхность плотной среды с последующим подсчетом выросших колоний, подробно описанный в работе [6]. В качестве контроля использовали данные о выросших колониях при посеве клеток без их облучения.

Выделение бактериофагов и определение их концентрации. Выделение бактериофагов M13K07, специфичных к указанным выше клеткам, проводили при низкой температуре в соответствии с методикой, представленной в работе [5]. Для определения количества частиц вирусов использовали спектрофотометрический метод. Измерения проводили на спектрофотометре UV-VIS Sperecord BS 250 (Analytik Jena, Германия). Исходя из того, что $2 \cdot 10^{14}$ фаговых частиц/мл соответствуют 30 опт. ед. [7], для расчетов использовали следующую формулу: $(A_{269} - A_{320}) \cdot 10^{14}/15$, где A_{320} и A_{269} — оптическая плотность суспензии фа-

гов при значениях длины волны электромагнитного излучения 320 и 269 нм соответственно.

Подготовка микробных клеток. Перед проведением анализа клетки используемого штамма отмывали от культуральной среды трехкратным центрифугированием в течение 5 мин при 2800 g. Затем полученную суспензию вновь центрифугировали в течение 1 мин при 110 g для устранения конгломератов. Оптическую плотность полученного супернатанта доводили дистиллированной водой до значения $OD_{660} = 0,42-0,45$, что соответствовало концентрации $4,5 \cdot 10^8$ клеток/мл [5].

Электронная микроскопия. Подготовку препаратов для электронно-микроскопического исследования проводили, как описано в работе [5]. Снимки были получены при ускоряющем напряжении 120 кВ на просвечивающем электронном микроскопе Libra 120 (Carl Zeiss, Германия) в Центре коллективного пользования научным оборудованием в области физико-химической биологии и нанобиотехнологии «Симбиоз» (ИБФРМ РАН).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования воздействия ТГц-излучения на жидкую культуру клеток *E. coli* XL-1 применяли описанный выше терагерцовый излучатель, а контроль полученных результатов осуществляли методами стандартного микробиологического посева, электронной микроскопии, электроакустического анализа и спектрального анализа.

Для проведения эксперимента суспензию микробных клеток (количество клеток 10^6 кл/мл) помещали в тефлоновую чашу диаметром 4 см и общим объемом 6 мл и подвергали воздействию ТГц-излучения в соответствии со схемой, представленной на рис. 2. Образцы суспензии клеток облучали различным количеством импульсов (5 — 50) ТГц-излучения.

Было экспериментально установлено, что после прохождения ~ 50 импульсов (энергия 10 Дж) через образец температура суспензии оставалась практически неизменной. Это также подтверждается оценкой изменения температуры ΔT после поглощения энергии 10 Дж по известной теплоемкости суспензии (воды) $C = 4183$ Дж/кг·град. Оно оказалось равным $\Delta T = 0,4^\circ\text{C}$.

Жизнеспособность микроорганизмов определяется, прежде всего, способностью клеток к делению. Поэтому в качестве контроля жизнеспособности клеток каждый образец сразу после облучения подвергали исследованию с помощью стандартного микробиологического посева колоний клеток *E. coli* XL-1 на чашки Петри с твердой питательной средой LB. Из полученных данных

Количество колоний клеток *E. coli* XL-1 при высеве на плотную среду после воздействия ТГц-излучением

Маркировка	Повторности			Среднее значение
	1	2	3	
Контроль – клетки без обработки, $\times 10^6$	194	239	187	206
ТГц облучение, кол-во импульсов:	Клетки после воздействия ТГц-излучения, $\times 10^6$			
5 импульсов (1,0 Дж)	164	52	157	157
6 импульсов (1,2 Дж)	155	117	142	138
7 импульсов (1,4 Дж)	176	121	104	133
8 импульсов (1,6 Дж)	102	135	106	114
20 импульсов (4 Дж)	77	95	86	86
30 импульсов (6 Дж)	58	41	46	48
40 импульсов (8 Дж)	26	15	29	23
40 импульсов (повтор) (8 Дж)	19	27	16	20
50 импульсов (10 Дж)	11	9	8	9
Контроль – клетки после кипячения в течение 5 мин	0	0	0	0

(рис. 5, таблица) видно, что количество колоний, которое прямо пропорционально количеству жизнеспособных клеток, уменьшается с увеличением числа импульсов ТГц-излучения.

Под гибелью бактерий понимается необратимая утрата способности расти и размножаться, а воздействие, приводящее к гибели бактерий, называется бактерицидным. Поскольку процесс жизнедеятельности бактерий хорошо виден под микроскопом, для дополнительного контроля полученных данных проводили электронно-микроскопическое исследование образцов клеток. Образцы клеток готовили сразу после их облучения. Электронно-микроскопические снимки представлены на рис. 6. Установлено, что у подвергнутых ТГц-излучению клеток наблюдается нарушение целостности клеточной мембраны.

Анализируя полученные данные, можно заключить, что поврежденные клетки обнаруживаются при обработке суспензии пятью импульсами ТГц-излучения и с увеличением числа импульсов увеличивается количество поврежденных клеток. Как видно из результатов эксперимента, эффект гибели 38% клеток *E. coli* XL-1 наступает уже при пороговом значении энергии

~6 Дж (30 импульсов), воздействующей на образец суспензии.

Известно, что, как и все вирусы, бактериофаги ведут паразитический образ жизни и их хозяевами являются бактериальные клетки [8,9]. При этом размножение бактериофага возможно только в живых клетках [10]. Ранее нами было показано, что при инфицировании клеток специфичным бактериофагом суспензия клеток меняет свои физические параметры [11,12]. Поэтому в данной серии экспериментов решено было использовать принцип взаимодействия бактериофага с микробными клетками как показатель жизнеспособности микроорганизмов. Регистрируя изменения физических параметров микробных клеток при их инфицировании бактериофагом до и после воздействия на них ТГц-излучения, можно сделать вывод о наличии в исследуемой суспензии живых клеток. В качестве тестовой системы для микробных клеток *E. coli* штамма XL-1 использовали специфичный им бактериофаг M13K07. Выбор данной модельной системы обусловлен тем, что в литературе хорошо описан бактериофаг M13K07 и процесс инфицирования им клеток штамма XL-1 [8,13].

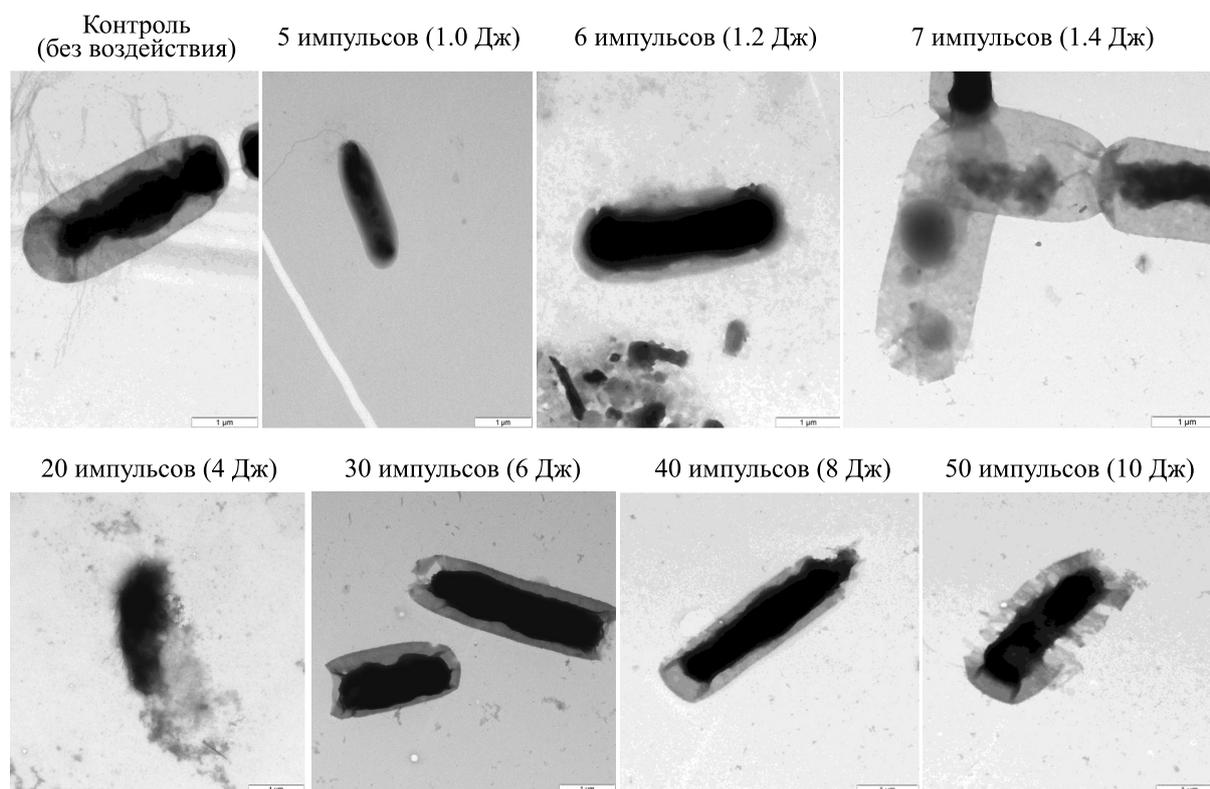


Рис. 6. Электронно-микроскопические снимки клеток *E. coli* после воздействия ТГц-облучения.

Поэтому для подтверждения экспериментальных данных о воздействии ТГц-излучения на суспензию клеток клеточные образцы подвергали также анализу с помощью акустического датчика путем регистрации информационного сигнала до и после добавления специфического бактериофага. Сопоставление данных микробиологического посева с данными акустического датчика показало, что в качестве параметра, однозначно связанного с количеством живых клеток, можно взять величину начального скачка полных потерь или фазы после добавления специфических бактериофагов к суспензии клеток (рис. 7а). На представленных временных зависимостях фазы и полных потерь датчика для суспензии клеток до облучения (клетки жизнеспособные) наблюдается резкое изменение фазы (от -170 до -430 град) и полных потерь (от -26 до -55 дБ). На рис. 7б приведены данные для суспензии клеток после облучения 50 импульсами (клетки нежизнеспособные). В этом случае изменения фазы и полных потерь датчика не происходят. Зависимости изменения полных потерь и фазы выходного сигнала датчика от числа облучающих импульсов при добавлении специфического бактериофага к суспензии клеток представлены на рис. 8а и 8б соответственно.

Видно, что графики, представленные на этих рисунках, качественно соответствуют графику на рис. 5, который показывает, что с ростом числа импульсов количество живых клеток уменьшается. Следует отметить, что на рис. 8а и 8б видны некоторые аномалии при числе импульсов, равном 6 и 7. Причина такой аномалии пока неизвестна.

После облучения ТГц-излучением образцы суспензии клеток подвергали также спектральному анализу с помощью установки, представленной на рис. 3. По результатам исследований на установке спектрального анализа была получена зависимость коэффициента прохождения электромагнитного излучения с длиной волны 10 мкм через облученную суспензию клеток от количества облучающих импульсов. Видно, что с увеличением числа импульсов и уменьшением количества живых клеток коэффициент пропускания увеличивается. Как и в случае с акустическим датчиком (рис. 8), при числе импульсов 6, 7, 8 и 20 наблюдается аномалия, причина которой, как уже отмечалось, неизвестна.

Как уже отмечалось выше, температура суспензии клеток после облучения практически не изменялась. Это означает, что импульсное воздействие ТГц-излучения на клетки имело нетеп-

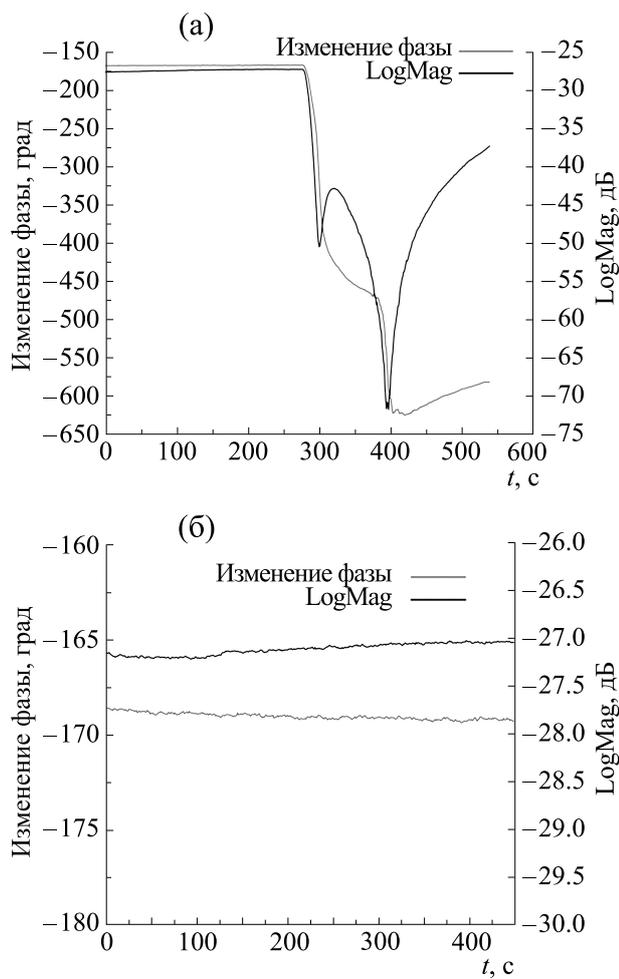


Рис. 7. (а) – Временные зависимости полных потерь и фазы выходного сигнала акустического датчика до и после добавления бактериофагов к суспензии клеток (клетки жизнеспособные); (б) – временные зависимости полных потерь и фазы выходного сигнала акустического датчика до и после добавления бактериофагов к суспензии клеток (клетки нежизнеспособные)..

ловой характер. Здесь следует более детально остановиться на физике явлений, происходящих в суспензии клеток при облучении ТГц-излучением. Известно [14], что коэффициент поглощения такого излучения при длине волны 66 мкм равняется примерно 800 Нп/см. Это означает, что глубина проникновения электромагнитной волны в суспензию составляла всего 10 мкм при высоте тefлоновой чаши, заполненной суспензией, равной 5 мм. Тем не менее 50 импульсов излучения убивали практически все клетки в полном объеме. Поэтому полученные результаты можно объяснить следующим образом. Падающий импульс излучения убивает все живые клетки на глубине 10 мкм. При этом по известным значениям

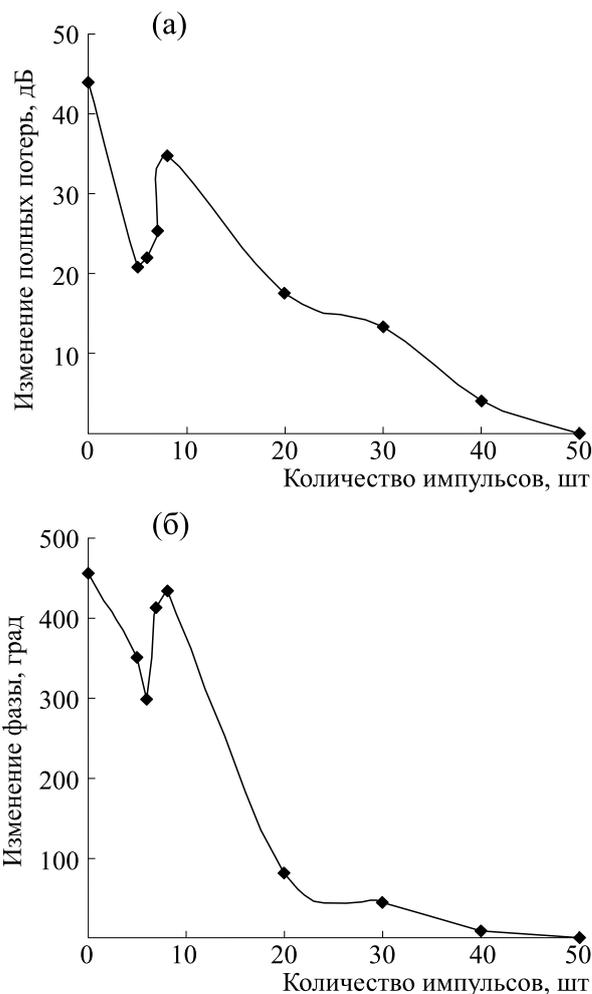


Рис. 8. (а) – Зависимость изменения полных потерь акустического датчика от числа облучающих импульсов при добавлении специфического бактериофага к суспензии клеток; (б) – зависимость изменения фазы акустического датчика от числа облучающих импульсов при добавлении специфического бактериофага к суспензии клеток.

энергии импульса ($W = 0,2$ Дж), теплоемкости суспензии ($C_{уд} = 4183$ Дж/(кг град)), объему приповерхностного слоя ($V = 12,56 \cdot 10^{-9}$ м³) и плотности суспензии ($\rho = 10^{-3}$ кг/м³) по известной формуле [15]

$$W = C_{уд} V \rho \Delta T, \quad (1)$$

можно определить изменение температуры ΔT , которое оказалось равным 3,8 град. Очевидно, что такое изменение температуры не может привести к гибели бактерий.

Поскольку частота повторения импульсов составляет 0,1 Гц, то к моменту прихода следующего импульса проходит 10 с. Представляется интерес-

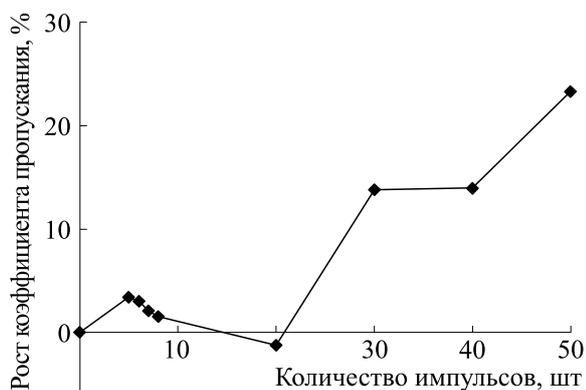


Рис. 9. Зависимость коэффициента прохождения электромагнитного излучения с длиной волны 10 мкм через облученную суспензию клеток от количества облучающих импульсов.

ным оценить время, в течение которого начальная температура T_1 приповерхностного слоя после облучения и температура T_0 остальной части суспензии станут одинаковыми. Для этого воспользуемся соотношением (2), которое следует из уравнения Ньютона–Рихмана [15]:

$$T(t) = T_1 + e^{-k t}(T_0 - T_1), \quad (2)$$

где $T(t)$ – мгновенное значение температуры слоя в момент времени t , $k = AS/C_{\text{слоя}}$, где A – коэффициент теплоотдачи (для разных слоев воды), S – площадь контакта слоя с основной массой суспензии, $C_{\text{слоя}}$ – теплоемкость слоя. В нашем случае $A = (140-340)$ Вт/(м² град), $S = \pi d^2/4 = 12,56 \cdot 10^{-4}$ м², $C_{\text{слоя}} = C_{\text{уд}}m = 5,25 \cdot 10^{-2}$ Дж/град, где $m = \rho V = 12,56 \cdot 10^{-6}$ кг – масса слоя. Отсюда следует, что температура слоя через 2 с будет равняться $T(t=2 \text{ с}) = T_1 + e^{-6,7}(T_0 - T_1) = T_1 + 0,001(T_0 - T_1) = (T_1 + 0,0038)$ град.

Итак, полная температурная релаксация суспензии происходит через 2 с. А за оставшиеся 8 с до прихода второго ТГц импульса происходит поступление живых бактериальных клеток в приповерхностный слой вследствие естественной диффузии, которые уничтожаются вторым ТГц-импульсом. Далее все эти процессы повторяются. Следовательно, с ростом числа импульсов количество живых клеток в суспензии уменьшается, и после 50 импульсов живых клеток в полном объеме суспензии практически не остается. При этом температура суспензии объемом 6 мл поднимается всего на 0,4°C. Для бактерий группы кишечной палочки такое незначительное увеличение температуры не может быть причиной их гибели. Таким образом, при облучении суспензии клеток

терагерцевыми импульсами происходят два независимых процесса: уничтожение всех клеток вблизи поверхности одним падающим импульсом и поступление живых клеток в поверхностный слой суспензии за счет естественной диффузии в промежутках между импульсами одной серии.

Полученные эксперименты открывают возможность регулировать жизнеспособность бактериальных клеток путем воздействия ТГц излучения с определенными параметрами.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 19-07-00300 и 19-07-00304).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. А. Ангелуц, А. В. Балакин, М. Г. Евдокимов и др., *Квантовая электроника* **44** (7), 614 (2014).
2. Y. C. Sim, J. Y. Park, K.-M. Ahn, et al., *Biomed. Opt. Express* **4** (8), 1413 (2013).
3. N. V. Ostrovskiy, C. M. Nikituk, V. F. Kirichuk, et al., in *Proc. Joint 30th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 13th Int. Conf. on Terahertz Electronics "IRMMW-THz 2005"* (2005), V. 1, p. 301.
4. I. Borodina, B. Zaitsev, A. Teplykh, et al., in *Proc. of IEEE Int. Ultrason. Symp.* (Taipei, Taiwan, 2015). DOI: 10.1109/ULTSYM.2015.0525.
5. O. I. Guliy, B. D. Zaitsev, I. A. Borodina, et al., *Talanta* **178**, 569 (2018).
6. O. I. Guliy, V. D. Bunin, D. O'Neil, et al., *Biosensors and Bioelectronics* **23**, 583 (2007).
7. G. P. Smith and J. K. Scott, *Methods Enzymol.* **217**, 228 (1993).
8. L. W. Deng, P. Malik, and R. N. Perham, *Virology* **253**, 271 (1999).
9. E. M. Click and R. E. Webster, *J. Bacteriol.* **179**, 6464 (1997).
10. М. Адамс, *Бактериофаги* (Медгиз, М., 1961).
11. О. И. Гулий, Б. Д. Зайцев, И. Е. Кузнецова и др., *Биофизика* **60** (4), 722 (2015).
12. О. И. Гулий, Б. Д. Зайцев, И. А. Бородина и др., *Биофизика* **61** (4), 744 (2016).
13. P. Endemann, *J. Mol. Biol.* **250**, 496 (1995).
14. J. Hu, K. W. Plaxco, and J. Allen, *J. Chem. Phys.* **124**, 036101-1 (2006).
15. В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер и др., *Теплотехника*, Учебник для ВУЗов, 2-е изд. (Высш. шк., М., 2000).

Investigation of the Impact of Terahertz Electromagnetic Radiation on Microbial Cell Viability

S.F. Boev*, A.I. Vagin*, S.Yu. Solomatin*, D.V. Savostyanov*, V.V. Siluyanov*, A.S. Shmakov*, B.D. Zaitsev**, A.A. Teplykh**, I.A. Borodina**, O.A. Karavaeva***, and O.I. Guliy**** *****

*Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications, ul. 8 Marta 10/5, Moscow 127083 Russia

**Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, ul. Zelenaya 38, Saratov, 410019 Russia

***Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Russian Academy of Sciences, prosp. Entuziastov 13, Saratov, 410049 Russia

****Saratov State Vavilov Agrarian University, Teatralnaya pl. 1, Saratov, 410012 Russia

The effect of pulsed terahertz radiation at 66 μm wavelength, pulse duration, 100 ns and pulse energy, 200 mJ on a suspension of microbial cells was investigated. It has been established that the effect of terahertz radiation leads to cell death at a total energy value of ~ 6 J. Since the temperature of the cell suspension after radiation remained almost unchanged, it implies that pulsed terahertz radiation exhibits a non-thermal effect. Seed inoculation technique, electron microscopy, electroacoustic analysis and spectral analysis were used in order to verify the results. The results obtained open prospects for governing the viability of bacterial cells using terahertz radiation with certain parameters.

Keywords: viability, electromagnetic radiation of the terahertz range, bacteriophages, Escherichia coli, electroacoustic method of analysis