

УДК 577.3:579.842.11:57.083:537.8

## РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ МИКРОВОЛН МОЛЕКУЛАМИ ДНК

© 2022 г. Б. Л. Ихлов<sup>1,\*</sup>, И. Л. Вольхин<sup>1</sup>, А. Ю. Ощепков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

\*E-mail: boris.ichlov@gmail.com

Поступила в редакцию 27.12.2021 г.

После доработки 11.08.2022 г.

Принята к публикации 07.09.2022 г.

В работе исследовано резонансное поглощение сверхвысокочастотного электромагнитного поля (СВЧ ЭМП) сантиметрового диапазона молекулами ДНК. Вместо раствора ДНК стандартно использовались культуры различных бактерий, для спиралей ДНК которых произведен расчет резонансных частот крутильных колебаний с учетом образования репликативных вилок в процессе репликации. Определены резонансные частоты ДНК трех типов бактерий. Культуры помещали в пробирки или кювету и подвергали воздействию облучения с помощью СВЧ генератора. Обнаружено пиковое поглощение СВЧ ЭМП культурами бактерий на расчетных частотах.

**Ключевые слова:** крутильные колебания, электромагнитное поле, сверхвысокая частота, нетепловой уровень плотности потока мощности

**DOI:** 10.31857/S0869803122060066

Как известно, возбужденная молекула ДНК бактерий способна излучать микроволны в СВЧ диапазоне [1]. Естественно предположить, что молекула ДНК поглощает электромагнитные волны в том же СВЧ диапазоне. Воздействие разных частот и интенсивностей сверхвысокочастотного электромагнитного поля (СВЧ ЭМП) на бактерии исследовалось только в плане оценки выживаемости, митотической активности, скорости деления клеток, стимуляции или в плане работы регуляторных систем бактерий [2–6].

Непосредственное воздействие на ДНК в культуре бактерий изучалось в миллиметровом диапазоне, литература по данному вопросу весьма обширна, некоторые частоты были идентифицированы авторами как собственные (резонансные) частоты различных типов колебаний молекулы ДНК, например, конформным, коллективным колебаниям больших молекулярных групп в ДНК, а также как резонанс водородных связей [7–10]. Воздействие СВЧ в сантиметровом диапазоне на ДНК оставалось не изученным, лишь предполагалось, что ДНК имеет собственные частоты в данном спектре [11]. Путем воздействия СВЧ ЭМП на штаммы *M. avium* 104 и *Mycobacterium tuberculosis* H<sub>37</sub>R<sub>v</sub>, были получены косвенные доказательства, что определенные частоты возбуждают в спиральных молекулах ДНК бактерий резонансные крутильные колебания [12].

Цель данного исследования — показать, что молекулы ДНК способны поглощать электромаг-

нитное излучение в СВЧ диапазоне, и поглощение имеет резонансный характер.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Проведенное предварительное рассмотрение существующих методик и инструментальных средств показало, что, несмотря на относительно небольшое число молекул ДНК в растворе, чувствительность современных анализаторов спектра, работающих в диапазоне СВЧ, достаточна для экспериментов с молекулами ДНК. Анализ также показал, что методика работы с внутриклеточными ДНК применима в области СВЧ, поскольку в клетках бактерий нет других молекул или органелл, которые способны реагировать на СВЧ ЭМП.

Важно отметить, что воздействие СВЧ ЭМП на электрические диполи в цепи ДНК (пары А–Т и Г–Ц как асимметричные образования), ввиду ее макроскопической длины, имеет классический характер, следовательно, крутильные колебания спирали ДНК описываются классическими законами. Для определения собственной частоты колебаний можно использовать формализм Лагранжа [13], при этом ДНК при скручивании ведет себя как стержень [14, 15]. В модели стержня резонансная частота крутильных колебаний молекулы ДНК  $f$  обратно пропорциональна корню квадратному из числа пар оснований (п.о.) в молекуле  $N$ :

$$f = kN^{-1/2}, \quad (1)$$

где коэффициент  $k = 21.75$  ГГц определяется с помощью экспериментальных данных [6]. Это общая формула крутильных колебаний любых ДНК, коэффициент  $k$  интегральным образом учитывает квазипериодичность молекулы, ее компактизацию и связанные с ней топологические напряжения, а также окружение молекулы [16, 17]. В силу того, что  $D/L \ll 1$ , где  $D$  – диаметр витка спирали ДНК,  $L$  – ее длина, не имеет значения, кольцевая ДНК или линейная, формула (1) остается справедливой. Число пар оснований в формуле может быть любым, например, для  $N = 400$  расчет дает частоту порядка 1 ГГц, что совпадает с [18].

Поскольку собственная частота крутильных колебаний ДНК зависит от длины спирали ДНК, для разных клеток она отличается по величине. Для бактерий она порядка 10 ГГц, для ДНК клеток человека – от 1.91 до 4.29 ГГц. Внешнее поле при совпадении частоты поля с собственной частотой колебаний ДНК возбуждает в молекуле крутильные колебания, которые препятствуют репликации ДНК, вследствие чего после нескольких “неудачных” подготовок к делению (в среднем шести клеточных циклов) клетка погибает [6]. Таким образом, факт резонансного поглощения электромагнитного поля СВЧ-диапазона молекулами ДНК доказан косвенно фактом резонансного снижения выживаемости клеток бактерий на расчетной частоте.

При проведении исследования важно учесть, что в случае репликации крутильные колебания спирали ДНК происходят с раскручиванием репликационных вилок и, соответственно, с увеличением момента инерции относительно оси спирали, поэтому репликация уменьшает резонансную частоту крутильных колебаний спирали ДНК. Кроме того, на частоту влияет эффект сверхспирализации. Например, ДНК бактерии *E. coli* – кольцевая, кольцо компактифицировано в соцветие. При возбуждении в молекуле крутильных колебаний число пар оснований на один виток ее спирали  $\gamma = 10$  изменяется, и, поскольку порядок зацеплений  $Lk = N/\gamma = \text{const}$  ( $Lk$  – порядок зацепления), в спирали возникает топологическое напряжение, которое приводит к сверхспирализации. Вследствие этого собственная частота крутильных колебаний молекулы меняется – ввиду изменения жесткости.

В экспериментах исследовалась культура – *E. coli* M17 с концентрацией  $(3-5) \times 10^8$  КОЕ в 1 мл или, по способу приготовления культуры, порядка  $10^8$  молекул ДНК, оптическая плотность раствора составляла 1.3%. Использовался нетепловой уровень плотности потока мощности СВЧ излучения 2.5 мВт/см<sup>2</sup>. Длина ДНК – 4483 110 п.о.,

соответственно, рассчитанная по формуле (1) частота равна 10.272 ГГц. Исследовались также культуры *M. avium* 104 и *Mycobacterium tuberculosis* H37Rv с той же оптической плотностью.

Чтобы исключить эффекты репликации и сверхспирализации, культуры готовили не в питательной среде, а в физрастворе, исследования проводили при температуре 21°C.

Источником излучения служил СВЧ-генератор Agilent Technologies E82570 1, для усиления сигнала до 1 Вт использовался усилитель мощности Agilent Technologies E82570 (рис. 1). Плотность потока мощности СВЧ-излучения составляла примерно 2.5 мВт/см<sup>2</sup>. Для определения величины поглощения цифровым осциллографом измерялось напряжение на выходе детектора, пропорциональное мощности СВЧ-излучения (детектор работал на квадратичном участке вольт-амперной характеристики) при наличии поглощающей среды и без нее.

Первые опыты проводились с культурой *E. coli* M17. Исследуемые растворы заливались в батарею из пяти стеклянных пробирок с внутренним диаметром 13 мм, высота столба растворов составляла 38 мм. Исследования были проведены в частотном диапазоне от 8.5 до 11.0 ГГц. Для грубой оценки шаг изменения частоты составлял 0.1 ГГц, затем, после определения суженного диапазона – 0.01 ГГц и, наконец, вблизи резонансной частоты – 0.001 ГГц.

Было установлено, что на резонансной частоте  $f_0 = 10.272 \pm 0.001$  ГГц коэффициент поглощения культурой бактерий составил 2%. Такой небольшой коэффициент поглощения объясняется малой концентрацией бактерий, соответственно, малой концентрацией макромолекул ДНК в физиологическом растворе и малым объемом исследуемой жидкости. После увеличения числа бактерий на несколько порядков, до оптической плотности культуры в пробирке с физраствором 7.3%, коэффициент поглощения достиг 4% на той же частоте. При приближении батареи пробирок к приемной антенне коэффициент поглощения возрастал. По итогам эксперимента был сделан вывод о том, что толщина пробирок, равная 14 мм, по порядку величины совпадает с длиной волны СВЧ-излучения в свободном пространстве 3.2 см, следовательно, имеет место дифракционный эффект на отдельных пробирках и интерференция вторичных волн в месте расположения приемной антенны.

Чтобы исключить обнаруженные эффекты, в последующих опытах пробирки были заменены плоскопараллельной кюветой из органического стекла с размерами сечения 100 × 78 мм, что совпадало с размерами раскрыва приемной антенны толщиной 14 мм. Кювету устанавливали на опти-

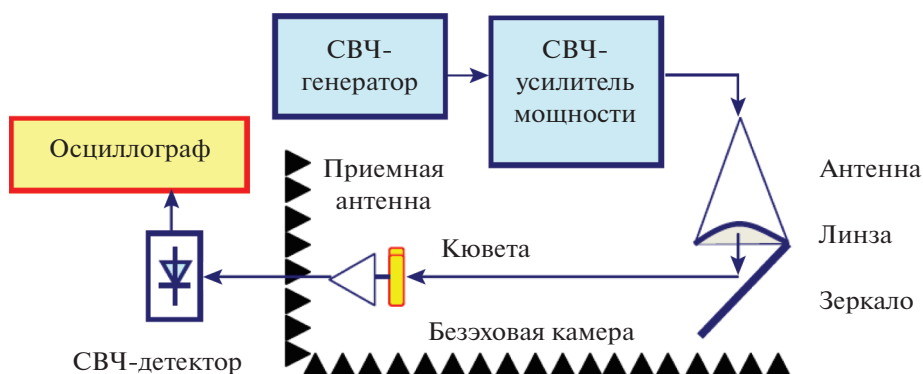


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Fig. 1. Scheme of the experimental setup.

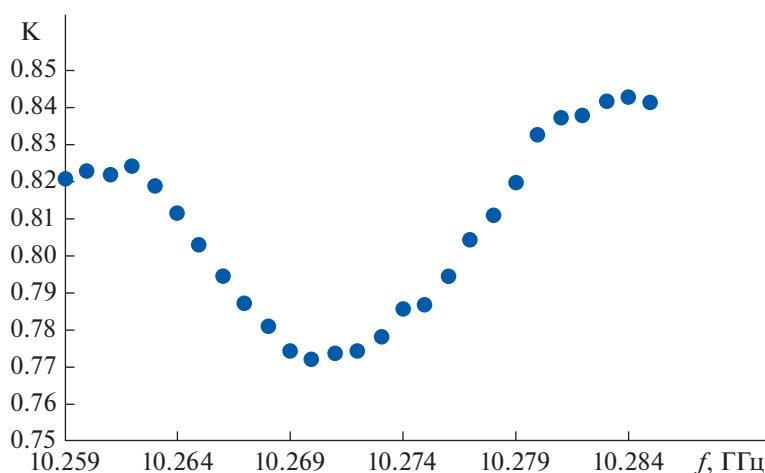


Рис. 2. Зависимость поглощения бактериальной культурой СВЧ ЭМП от частоты.

Fig. 2. Frequency dependence of the absorption of microwave electromagnetic fields by a bacterial culture.

мальном расстоянии, вплотную к приемной антенне.

Для исключения спектра поглощения физраствором и кюветой и получения эффективного поглощения, измерения проводили дважды: с кюветой, заполненной физиологическим раствором 4% и с раствором исследуемой культуры. Коэффициенты поглощения СВЧ-излучения пробирками с физиологическим раствором и с раствором исследуемой культуры определяли следующим образом. В 1 мл содержится порядка  $10^{26}$  молекул (по известной формуле через число Авогадро, массу 1 мл и молярную массу  $N_{Am}/\mu$ ) физиологического раствора, поэтому с учетом малой концентрации культуры *E. coli* M17 ( $10^8$  молекул ДНК), эффекты переоблучения молекул можно не учитывать и для расчета поглощения параллельного монохроматического пучка излучения в поглощающей среде использовать закон Бугера–Ламберта  $I(x) = I_0 \exp(-kx)$ , где  $I_0$  и  $I(x)$  – интен-

сивности падающего и прошедшего на глубину  $x$  излучения,  $k$  – коэффициент поглощения на соответствующей частоте.

С учетом закона Бугера–Ламберта, коэффициент пропускания определялся по отношению напряжений  $U$ :

$$K = U_{\text{с_бактериями}} / U_{\text{без_бактерий}}$$

( $U_0$  нормировалось к единице).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерений представлены на рис. 2. Обработка полученных данных позволяет определить значения коэффициентов поглощения.

1. Нерезонансное поглощение, средний уровень  $K_{\text{не рез}} = (0.823 + 0.838)/2 = 0.8305 \approx 0.83$ .

2. Резонансное поглощение на уровне половинной мощности  $K_{\text{рез}/2} = (0.83 + 0.772)/2 \approx 0.8$ .

3. Резонансное поглощение на частоте резонанса  $K_{\text{рез } f_0} = 0.8305 - 0.7720 \approx 0.059$ .

Принимая 0.83 за 100%, находим, что величина поглощения составляет 7.0%.

Для добротности системы получаем следующие результаты. С учетом толщины стенок кюветы 3 мм толщина слоя жидкости  $x = 17$  мм, при этом коэффициент нерезонансного поглощения составляет  $k_{\text{нерез}} = (0.11 \pm 0.01) \text{ см}^{-1}$ , а резонансного на частоте  $f_0 = 10.272$  ГГц  $- k_{\text{рез}} = (0.04 \pm 0.01) \text{ см}^{-1}$ . Таким образом, суммарное резонансное и нерезонансное поглощение на указанной частоте составляет  $k_{\text{рез}} + k_{\text{нерез}} = (0.15 \pm 0.01) \text{ см}^{-1}$ . Добротность резонансной системы на уровне половинного резонансного поглощения, рассчитанная по формуле  $Q = f_0 / (f_b - f_n) = 1030$ , где  $f_b$  и  $f_n$  — верхняя и нижняя границы полосы резонансного поглощения на уровне половинной мощности. Это большая величина, пик резонансной кривой очень острый.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

На резонансной частоте  $f_0 = 10.271 \pm 0.001$  ГГц на культуре *E. coli* M17 в опытах с кюветой получено эффективное поглощение  $7.0 \pm 0.8\%$ . Определенная резонансная частота с учетом погрешности совпадает с результатами опытов с пробирками  $f_0 = 10.272 \pm 0.001$  ГГц и близка к расчетной величине 10.260 ГГц.

На культуре *M. avium* эффективное поглощение составило 7.3%, резонансная частота  $- f_0 = 10.317 \pm 0.001$  ГГц и близка к расчетной 10.31 ГГц.

На культуре *Mycobacterium tuberculosis* — 7.1%,  $f_0 = 10.356 \pm 0.001$  ГГц и близка к расчетной величине 10.36 ГГц.

Таким образом, результаты исследования являются прямым доказательством наличия резонансного поглощения молекул ДНК в СВЧ спектре. Поглощение ЭМП культурами бактерий имело место почти строго на той частоте, которая соответствовала расчетным собственным частотам крутильных колебаний соответствующих молекул ДНК. Следовательно, эффект резонансного поглощения молекулами ДНК электромагнитного поля сверхвысокой частоты существует, и резонансная частота является собственной частотой крутильных колебаний молекул ДНК.

Результаты исследования могут быть положены в основу метода идентификации различных типов бактерий.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят канд. мед. наук В.В. Новикову за помощь в работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аншелевич В.В., Вологодский А.В., Лукашин А.В., Франк-Каменецкий М.Д. Определение амплитуды флуктуаций двойной спирали ДНК // ЖЭТФ. 1974. Т. 66. С. 2153; Т. 67. С. 1876. [Anshelevich V.V., Vologodskiy A.V., Lukashin A.V., Frank-Kamenetskiy M.D. Opredeleniye amplitudy fluktuatsiy dvoynoy spirali DNK // ZhETF. 1974. T. 66. S. 2153; T. 67. S. 1876 (In Russ.)]
2. Антипов С.С. Влияние ЭМИ СВЧ на регуляторные системы *Escherichia coli*: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Пушкино, 2007. [Antipov S.S. Influence of microwave radiation on the regulatory systems of *Escherichia coli*: Abstr. PhD dissertation. Pushchino, 2007 (In Russ.)]
3. Гераськин С.А., Казьмин Г.В. Оценка последствий воздействия физических факторов на природные и аграрные экологические системы // Экология. 1995. № 6. С. 419–423. [Geraskin S.A., Kazmin G.V. Evaluation of the consequences of the impact of physical factors on natural and agrarian ecological systems // Ecology. 1995. № 6. P. 419–423 (In Russ.)]
4. Монич В.А., Малиновская С.Л., Махрова Т.В., Малиновский Д.С. Особенности воздействия низкоинтенсивных электромагнитных излучений различных диапазонов на микроорганизмы // Вестн. Нижегородского ун-та. 2010. № 2. С. 435–438. [Monich V.A., Malinovskaya S.L., Makhrova T.V., Malinovsky D.S. Features of the impact of low-intensity electromagnetic radiation of various ranges on microorganisms // Bull. Nizhny Novgorod University. 2010. № 2. P. 435–438 (In Russ.)]
5. Тифлова О.А., Кару Т.Т. Stimulation of *Escherichia coli* division by low-intensity monochromatic visible light // Photochem. Photobiol. 1988. V. 48. № 1. P. 467–471.
6. Козьмин Г.В., Егорова В.И. Устойчивость биоценозов в условиях изменяющихся электромагнитных свойств биосферы // Биомед. технологии и радиоэлектроника. 2006. № 3. С. 61–72. [Kozmin G.V., Egorova V.I. Stability of biocenoses under conditions of changing electromagnetic properties of the biosphere // Biomed. Technologies and Radioelectronics. 2006. № 3. pp. 61–72 (In Russ.)]
7. Цуркан М.В., Собакинская Е.А., Смолянская О.А. Исследование спектра молекулы ДНК в терагерцовой области частот // Науч.-техн. вестн. СПбГУ информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1 (77). С. 15–18. [Zurkan M.V., Sobakinskaya E.A., Smolyanskaya O.A. Investigation of the DNA molecule spectrum in the terahertz frequency range // Scientific and technical bulletin of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2012. № 1 (77). P. 15–18 (In Russ.)]
8. Fisher V.M. Far-infrared vibrational modes of DNA components studied by terahertz time domain spectroscopy // Phys. Med. Biol. 2002. V. 47. P. 3807–3814.
9. Globus T., Sizov I., Gelmont B. Terahertz vibrational spectroscopy of *E. coli* and molecular constituents: Computational modeling and experiment // Adv. Biosci. Biotechnol. 2013. № 4. P. 493–503. <https://doi.org/10.4236/abb.2013.43A065>

10. Vaks V.L., Semenova A.V., Khodzitsky M.K. et al. Gyrotropy and absorption of DNA and amylose at THz frequencies // Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz. 2016. P. 7758458.
11. Бинги В. Принципы электромагнитной биофизики. М.: Физматлит, 2011. С. 345. ISBN 978-5-9221-1333-5. [Bingi V. Principles of electromagnetic biophysics. M.: Fizmatlit, 2011. P. 345. ISBN 978-5-9221-1333-5.] (In Russ.)]
12. Ихлов Б.Л., Шурьгин А.А., Дробкова В.А. Возможность бактерицидного действия СВЧ на штаммы *Mycobacterium Avium* и *Mycobacterium Tuberculosis* // Туберкулез и болезни легких. 2019. Т. 97. № 1. С. 25–27. [Ikhlov B.L., Shurygin A.A., Drobkova V.A. Possibility of bactericidal action of microwave on strains of *Mycobacterium Avium* and *Mycobacterium Tuberculosis* // Tuberculosis and lung diseases. 2019. V. 97. № 1. P. 25–27 (In Russ.)] <https://doi.org/10.21292/2075-1230-2019-97-1-25-27>
13. Тихонов А.Н., Самарский А.А. «Уравнения математической физики». М.: Наука, 1977. 736 с. [Tikhonov A.N., Samarsky A.A. Equations of mathematical physics. M.: Nauka, 1977. 736 p. (In Russ.)]
14. Traves A.A., Thompson M.T. An Introduction of Mechanics of DNA. Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences // Mechanics of DNA. 2004. V. 362. № 1820. P. 1265–1279.
15. Strick T., Allemand J.-F., Croquette V., Bensimon D. Twisting and stretching single DNA molecules // Progress in Biophysics & Molecular Biology. 2000. № 74. P. 115–140.
16. Ихлов Б.Л. Спектры ДНК // Вестн. новых мед. ицинских технологий. 2018. Т. 25. № 2. С. 121–134. [Ikhlov B.L. Spectra of DNA // Bulletin of New Medical Technologies. 2018. V. 25. № 2. P. 121–134 (In Russ.)]
17. Ихлов Б.Л., Мельниченко В.А., Ощепков А.Ю. Действие высокочастотного электромагнитного поля на микроорганизмы // Вестн. новых мед. технологий. 2017. Т. 24. № 2. С. 141–146. [Ikhlov B.L., Melnichenko V.A., Oshchepkov A.Yu. Effect of high-frequency electromagnetic field on microorganisms // Bulletin of New Medical Technologies. 2017. V. 24. № 2. P. 141–146 (In Russ.)]
18. Ковалева А.Н., Маневич И.Л., Мусиенко А.А., Савин А.В. Низкочастотные локализованные колебания двойной спирали ДНК // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2009. Т. 51. № 7. С. 1174–1188. [Kovaleva A.N., Manevich I.L., Musienko A.A., Savin A.V. Low-frequency localized oscillations of the DNA double helix // High Molecular Weight Compounds. Ser. A. 2009. V. 51. № 7. pp. 1174–1188 (In Russ.)]

## Resonant Absorption of Microwaves by DNA Molecules

B. L. Ikhlov<sup>a,#</sup>, I. L. Volkhin<sup>a</sup>, and A. Yu. Oshchepkov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Perm State National Research University, Perm, Russia

<sup>#</sup>E-mail: boris.ikhlov@gmail.com

The aim of the study is to detect the resonant absorption of an ultrahigh-frequency electromagnetic field (MICROWAVE EMF) in the centimeter range by DNA molecules at a frequency corresponding to the natural frequency of torsional vibrations of the DNA helix. Instead of the DNA solution, cultures of various bacteria were used, the resonant frequencies of DNA helices' torsional vibrations of which were calculated. The cultures were placed in test tubes or a cuvette and exposed to a microwave generator. A theoretical analysis of the reaction of DNA to external ultrahigh-frequency radiation, including taking into account the environment and in the process of replication with the formation of replicative forks, was carried out, and the resonant frequencies of DNA of bacteria were determined. The peak absorption of microwave EMF by bacterial cultures was found at the calculated frequencies corresponding to the natural frequencies of torsional vibrations of bacterial DNA helices.

**Keywords:** torsional vibrations, power flux density, electromagnetic field, ultrahigh frequency