

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАТОГЕННЫХ БАКТЕРИЙ ПО СПЕКТРУ НАТИВНЫХ МОЛЕКУЛ ДНК

© 2023 г. Б.Л. Ихлов*, #

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Букирева, 15/1, Пермь, 614998, Россия

#E-mail: boris.ichlov@gmail.com

Поступила в редакцию 16.05.2022 г.

После доработки 14.07.2022 г.

Принята к публикации 19.07.2022 г.

Задачей исследования является обнаружение низкочастотного (относительно инфракрасного и ультрафиолетового) резонансного поглощения электромагнитного поля сантиметрового диапазона молекулами ДНК на частоте, соответствующей собственной частоте крутильных колебаний спирали нативной ДНК с целью установления связи между длиной ДНК (ее спектром) и типом бактерии. Вместо раствора ДНК стандартно были использованы культуры различных бактерий, содержащих ДНК, для спиралей которых проведен расчет резонансных частот крутильных колебаний. Культуры помещали в пробирки или кювету и подвергали облучению СВЧ-генератора. Проведен теоретический анализ реакции ДНК на внешнее сантиметровое излучение, определены резонансные частоты ДНК трех типов бактерий: *E. coli* M17, *M. avium* и *Mycobacterium tuberculosis*. Обнаружено пиковое поглощение сверхвысокочастотного электромагнитного поля культурами бактерий на частотах, близких к расчетным собственным частотам крутильных колебаний спиралей ДНК данных типов бактерий: 10.271, 10.317 и 10.356 ГГц соответственно.

Ключевые слова: крутильные колебания, плотность потока мощности, электромагнитное поле, сверхвысокая частота.

DOI: 10.31857/S0006302923030092, EDN: FRFWLB

Как известно, возбужденная молекула ДНК бактерий способна излучать микроволны в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне [1]. Естественно предположить, что молекула ДНК поглощает электромагнитные волны в том же СВЧ-диапазоне.

Воздействие разных частот и интенсивностей СВЧ электромагнитного поля на бактерии исследовалось только в плане оценки выживаемости, митотической активности, скорости деления клеток, стимуляции или в плане работы регуляторных систем бактерий [2, 3]. Непосредственное воздействие на ДНК в культуре бактерий изучалось в миллиметровом диапазоне, некоторые частоты были идентифицированы авторами как собственные (резонансные) частоты различных типов колебаний молекулы ДНК, например, конформные, коллективные колебания больших молекулярных групп в ДНК, а также как резонанс водородных связей [4, 5].

Воздействие микроволн сантиметрового диапазона на ДНК в части крутильных колебаний

спиралей ДНК остается слабо изученным. В работе [6] было изучено воздействие сантиметровых волн на клетки хомяка и выявлено, что под воздействием СВЧ происходят мутагенные процессы, в которые вовлечены молекулы ДНК, обнаружено также, что СВЧ вызывает изменение в синтезе и структуре ДНК. В работе [7] проведено исследование действия СВЧ на ДНК, обнаружено, что СВЧ дезактивирует бактериальные клетки, сделано предположение, что бактериальная инактивация может быть объяснена деактивацией генов, регулирующих окисление, и повреждением ДНК. В частности, бактерии золотистого стафилококка облучались импульсным полем с пиковой частотой 3.5 ГГц.

В чем механизм изменений структуры ДНК или дезактивации генов и в чем состояла дезактивация бактерий – осталось нераскрытым. Ранее лишь предполагалось, что ДНК имеет собственные частоты конформационных колебаний в данном спектре [1; 8, с. 345].

В работах [9, 10] путем воздействия СВЧ электромагнитного поля на штаммы *E. coli* ATCC 25922, *M. avium* 104 и *Mycobacterium tuberculosis*

Сокращение: СВЧ – сверхвысокочастотный.

$H_{37}R_y$ (*Pasteur*) ATCC 25618, были получены косвенные доказательства, что определенные резонансные частоты возбуждают в спиральях молекул ДНК бактерий крутильные колебания.

Цель данного исследования — провести прямой эксперимент, показывающий, что нативные молекулы ДНК способны поглощать электромагнитное излучение в СВЧ-диапазоне резонансным образом.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В клеточных организмах, помимо ДНК, нет молекул, которые бы соответствовали сантиметровому диапазону. Не только у макромолекул имеется СВЧ-спектр, например, вращательный спектр трифторйодметана (CF_3I) лежит в диапазоне 6–18 ГГц, для аммиака (NH_3 , инверсионное расщепление энергетических уровней) — в диапазоне 3.00–1.33 ГГц, для молекулы ND_3 — 1.7–2.0 ГГц. Однако, с одной стороны, таких молекул нет в живых клетках, во-вторых, вращательно-колебательные спектры клеточных макромолекул располагаются вне сантиметрового диапазона, в УФ- и ИК-областях, те же спектры содержащихся в клетке катиона NH_4^+ или анионов $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^{2-} , SO_4^{2-} тоже находятся в терагерцовой и ИК-областях. Таким образом, резонанс крутильных колебаний ДНК в СВЧ-диапазоне отдален от спектров других молекул клетки и может быть легко определен. СВЧ-излучение затрагивает к клетке исключительно молекулы ДНК.

Оценим, возможно ли обнаружение поглощения молекулами ДНК не в растворе ДНК, а в ткани или в культуре бактерий. В 1 см^3 , например, ткани печени — 200 млн. клеток, т.е. имеем порядков 10^8 . Плюс 4 порядка — единица точности, скажем, газоанализатора. Если число пар нуклеотидов 10^6 – 10^7 , то получаем $8 + (6-7) + 4 = 18$ –19 порядков. Для сравнения: число Лошмидта, т.е. число молекул в см^3 — порядка 10^{19} . Если за образец брать, скажем, чувствительные ЭПР-спектрометры, работающие в диапазоне СВЧ, то их чувствительность — 10^{-12} – 10^{-14} (от числа Авогадро). Следовательно, чувствительности обычных анализаторов спектра для ткани достаточно с избытком.

Число колоний бактерий в 1 мл суспензии — порядка 10^{10} , то есть, с учетом 6 порядков, которые добавляют миллионы нуклеотидов ДНК, обычный анализатор СВЧ-спектра вполне способен обнаружить поглощение молекулами ДНК.

Воздействие СВЧ электромагнитного поля на диполи цепи ДНК ввиду ее макроскопической

длины может иметь только классический характер, крутильные колебания ее спирали описываются классическими законами. Если рассмотреть квантовый осциллятор, уравнение для волновой функции записывается в виде:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{m\omega^2 x^2}{2} \psi = E\psi.$$

Здесь $\hbar$ — постоянная Планка, m — масса осциллятора, ω — круговая частота, ψ — волновая функция, x — координата, E — энергия. Уравнение имеет решение, выражаемое через полиномы Эрмита, при этом выражение для энергии должно выглядеть следующим образом:

$$E_n = \hbar\omega(n + \frac{1}{2}), \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

В случае крутильных колебаний уравнение приобретает вид

$$-\frac{2\hbar^2}{md^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \frac{Gd^2 \phi^2}{8} \psi = E\psi,$$

где G — жесткость осциллятора, d — его длина, ϕ — угол поворота. Тогда

$$E_n = \frac{2\hbar}{m} \sqrt{\frac{G}{J}} (n + \frac{1}{2}).$$

Здесь J — момент инерции элементарного осциллятора на спирали, $J = md^2/4$. Теперь пусть момент инерции увеличивается вследствие увеличения длины на dr . Тогда уравнение запишется в следующем виде:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) \psi + \frac{Gr^2 \phi^2}{8} \psi = E\psi,$$

где r — радиус осциллятора, т.е. координата, которая изначально не дискретна. Но каждому уровню энергии в полуклассическом приближении можно поставить в соответствие радиус $r_n = an^2$, где $a = \hbar/kme^2$ — боровский радиус ($k = 1/4\pi\epsilon_0$, ϵ_0 — электрическая постоянная, m — масса, e — заряд электрона).

В случае атома Бора изменение орбиты происходит за счет поглощения кванта электромагнитного поля, в случае дипольного осциллятора — за счет подкачки энергии ферментами. В классическом случае при колебаниях с собственной частотой f_0 энергия $E = G$, поскольку $E = J\omega^2/2$, и увеличение радиуса не ведет к изменению энергии, а только к снижению частоты в соответствии с законом сохранения момента импульса. Классический крутильный маятник не имеет спектра колебательных мод, в спектре частот — лишь единственная собственная частота f_0 . Если же уровни энергии дискретны, очевидно, что увеличение

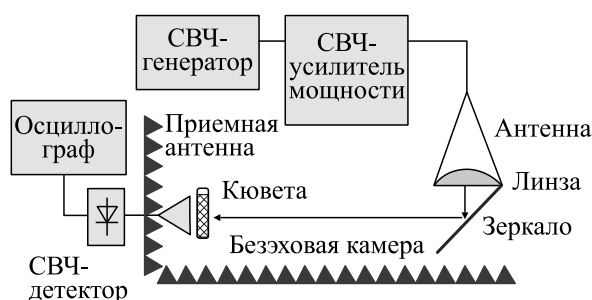


Рис. 1. Принципиальная схема установки.

диаметра осциллятора и соответственно снижение частоты тоже должны носить дискретный характер. Например, если упрощенно представить энергию как возрастающую $E_{n+1} = aE_n$, и по аналогии с атомом Бора представить возрастание радиуса $r_{n+1} = br_n$, где a и b — возрастающие целочисленные функции от натурального ряда n и больше единицы, то

$$\omega_{n+1} = \sqrt{\frac{a}{b}} \omega_n.$$

Таким образом, две первые ближайшие частоты отличаются друг от друга примерно в полтора раза, что опровергается экспериментом — указанные различия частот в полтора раза не обнаруживаются.

Поэтому вместо уравнения Шредингера, чтобы получить выражение для собственной частоты, можно использовать формализм Лагранжа, при этом ДНК при скручивании ведет себя как стержень [11, 12], классическим, а не квантовым образом.

ДНК бактерий — 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 составляет $Lk = N/y = \text{const}$ (Lk — порядок зацепления, N — число пар оснований в молекуле), в спирали возникает топологическое напряжение. Вследствие этого собственной частота крутильных колебаний молекулы меняется — ввиду изменения жесткости.

В модели стержня резонансная частота электромагнитного поля обратно пропорциональна корню квадратному из N :

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

где N — число пар нуклеотидов, коэффициент $k = 21.75$ определяется с помощью экспериментальных данных, включает в себя интегральным образом компактификацию ДНК, возникающие топологические напряжения и ее окружение. Это общая формула крутильных колебаний любой

ДНК [13], для $N = 400$ расчет дает частоту порядка 1 ТГц, что совпадает с результатом, приведенным в работе [14]. В процесс репликации частота крутильных колебаний спирали ДНК понижается [13].

Таким образом, вследствие неквантовости сантиметровой спектр нативных ДНК прост, состоит из единственной линии и легко прочитывается.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментах исследовали культуру *E. coli* M17 с концентрацией $(3-5) \cdot 10^8$ КОЕ в 1 мл или, по способу приготовления культуры, порядка 10^8 молекул ДНК на 1 мл, коэффициент оптической плотности раствора — 1.3%. Культуры доводили до стационарной фазы и далее, чтобы исключить эффекты репликации и соответственно сверхспирализации, помещали в физиологический раствор.

Использовали нетепловой уровень плотности потока мощности СВЧ-излучения 2.5 мВ/см^2 . Длина ДНК — 4483110 п.н., рассчитанная по формуле (1) частота — 10.272 ГГц.

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

На рис. 1 приведена принципиальная схема экспериментальной установки. Источником излучения являлся СВЧ-генератор Agilent Technologies E82570 1 (США), для усиления сигнала до 1 Вт использовали усилитель мощности Agilent Technologies E82570 (США). Плотность потока мощности СВЧ-излучения составляла примерно 2.5 мВ/см^2 . В качестве антенны использовали чувствительный усилитель ДКВ-8 (Россия).

Для определения резонансной частоты опыты проводили по следующей методике: цифровым осциллографом измеряли напряжение на выходе детектора, которое было пропорционально мощности СВЧ-излучения (детектор работал на квад-

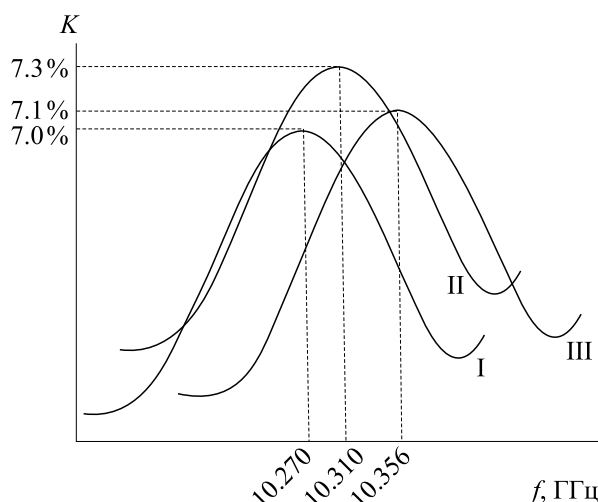


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения от частоты излучения.

ратичном участке вольт-амперной характеристики). Исследования 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.

Установлено, что на резонансной частоте $f_0 = 10.272 \pm 0.001$ ГГц коэффициент поглощения культурой бактерий довольно низкий, что объясняется малой концентрацией бактерий, соответственно малой концентрацией макромолекул ДНК в физиологическом растворе и малым объемом исследуемой жидкости. Если на несколько порядков увеличить число бактерий, чтобы коэффициент оптической плотности культуры в пробирке с физиологическим раствором составил 7.3%, то коэффициент поглощения существенно увеличивается. При приближении кюветы к приемной антенне коэффициент поглощения возрастал, было установлено оптимальное расстояние в 13 см.

Обычно для проведения подобных экспериментов используют пробирки, однако при наличии батареи пробирок имеет место дифракционный эффект на отдельных пробирках и интерференция вторичных волн в месте расположения приемной антенны. Чтобы исключить подобные эффекты, пробирки были заменены плоскопараллельной кюветой из органического стекла с размерами сечения 100×78 мм, что совпадает с размерами раскрытия приемной антенны, и толщиной 14 мм. Кювету устанавливали на оптимальном расстоянии, вплотную к приемной антенне.

Чтобы исключить спектр физиологического раствора и кюветы и получить эффективное поглощение, измерения проводили дважды: с кюве-

той, заполненной 4%-м физиологическим раствором, и с раствором исследуемой культуры.

Рассчитаны коэффициенты поглощения СВЧ-излучения кюветой с физиологическим раствором и с раствором исследуемой культуры.

В 1 мл содержится порядка 10^{26} молекул (по известной формуле через число Авогадро, массу 1 мл и молярную массу $N_A m/\mu$) 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 $I = I_0 \exp(-kx)$, где I_0 и $I(x)$ — интенсивности падающего и прошедшего на глубину x излучения, k — коэффициент поглощения на соответствующей частоте.

Таким образом, ввиду закона Бугера—Ламберта коэффициент поглощения определяли по отношению напряжений U :

$$K = U_{\text{без бактерий}} / U_{\text{с бактериями}} \quad (2)$$

(U_0 нормируется к единице). Полученная зависимость коэффициента поглощения от частоты излучения приведена на рис. 2.

Расчет коэффициента поглощения. С помощью формулы (2) получены следующие значения: коэффициенты поглощения вдали от резонанса — 0.823 и 0.838, резонансное поглощение на уровне половинной мощности — 0.823 и 0.772.

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

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 $K_{\text{рез}_f0} = 0.83 - 0.772 \approx 0.058$.

Принимая 0.83 за 100%, получаем поглощение 7.0%.

Расчет погрешности измерений, связанной с разными уровнями нерезонансного поглощения справа и слева от резонансной частоты:

$$K_{\text{рез}_f0_слева} = 0.823 - 0.772 = 0.051.$$

Принимая 0.823 за 100%, получаем $K_{\text{рез}_f0_слева} = 6.197\% \approx 6.2\%$.

$$K_{\text{рез}_f0_справа} = 0.838 - 0.772 = 0.066.$$

Принимая 0.838 за 100%, получаем $K_{\text{рез}_f0_справа} = 7.876\% \approx 7.9\%$.

Среднее значение составляет $(6.2 + 7.0 + 7.9)/3 = 7.033 \approx 7.0\%$, как и было рассчитано раньше, но теперь видна погрешность — 0.8% вниз и 0.9% вверх, можно считать $\pm 0.9\%$.

С учетом толщины стенок кюветы 3 мм толщины слоя жидкости $x = 17$ мм, при этом коэффициент нерезонансного поглощения составляет $k_{\text{не_рез}} = (0.11 + 0.01) \text{ см}^{-1}$, а резонансного на частоте $f_0 = 10.272 \text{ ГГц}$ — $k_{\text{рез}} = (0.04 + 0.01) \text{ см}^{-1}$. Таким образом, суммарное резонансное и нерезонансное поглощение на указанной частоте составляет $k_{\text{рез}} + k_{\text{не_рез}} = (0.15 + 0.01) \text{ см}^{-1}$.

Добротность резонансной системы на уровне половинного резонансного поглощения, рассчитанная по формуле $Q = f_0 / (f_v - f_n)$, равна 1030, где f_v и f_n верхняя и нижняя границы полосы резонансного поглощения на уровне половинной мощности. Это большая величина, поэтому пик резонансного поглощения достаточно выделен.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Поскольку собственная частота крутильных колебаний ДНК зависит от длины спирали ДНК, для разных клеток она отличается по величине.

Для ДНК бактерий она составляет порядка 10 ГГц, для ДНК 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 (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.

В ходе эксперимента на резонансной частоте $f_0 = 10.271 \pm 0.001 \text{ ГГц}$ на культуре *E. coli* M17 получено эффективное поглощение $7.0 \pm 0.8\%$ (рис. 2, кривая I). Определенная резонансная частота в погрешности совпадает с результатами предыдущих опытов ($f_0 = 10.272 \pm 0.001 \text{ ГГц}$) и близка к расчетной по формуле (1) величине 10.26 ГГц.

На культуре *M. Avium* 104 с коэффициентом оптической плотности 7.0% эффективное поглощение составило 7.3%, резонансная частота — $f_0 = 10.317 \pm 0.001 \text{ ГГц}$ и близка к расчетной величине 10.31 ГГц (рис. 2, кривая II).

На культуре *Mycobacterium tuberculosis* H37Rv с коэффициентом оптической плотности 6.9–7.1% $f_0 = 10.356 \pm 0.001 \text{ ГГц}$ и близка к расчетной по формуле (1) величине 10.36 ГГц (рис. 2, кривая III).

С учетом концентрации бактериальной культуры $m = (3-5) \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ в слое физиологического раствора площадью $S = 1 \text{ см}^2$ и толщиной $l = 1.7 \text{ см}$ содержится $M = (5.1-8.5) \cdot 10^8$ бактерий, соответственно, столько же молекул ДНК. Это позволяет провести оценку микроскопического сечения σ поглощения СВЧ-излучения отдельной молекулой ДНК на резонансной частоте:

$$\sigma_f = \sigma_{\text{нерез}} + \sigma_{\text{рез}} = \frac{k_{\text{нерез}}}{M} + \frac{k_{\text{рез}}}{M} = (1,8 \pm 0,5)10^{-10} \text{ см}^{-1} + (0,7 \pm 0,2)10^{-10} \text{ см}^{-1} = (2,5 \pm 0,5)10^{-10} \text{ см}^{-1}.$$

Актуальность данного расчета в том, что знание макроскопического сечения поглощения позволяет проводить расчеты коэффициентов поглощения в зависимости от концентрации бактерий и толщины слоя бактериального раствора.

ОБСУЖДЕНИЕ

Данное исследование является прямым доказательством резонансного поглощения молекул

ДНК в СВЧ-спектре. Поглощение электромагнитного поля культурами бактерий имело место почти строго на той частоте, которая соответствовала расчетным собственным частотам крутильных колебаний соответствующих молекул ДНК. Таким образом, доказано, что эффект поглощения нативными молекулами ДНК электромагнитного поля сверхвысокой частоты существует, и эта частота является собственной частотой крутильных колебаний молекул ДНК.

Тот момент, что график резонансного поглощения не имеет стандартного вида и несимметричен вблизи точки резонанса, объясняется отношением D/L , где D — диаметр спирали ДНК, L — ее длина; для того, чтобы достичь симметрии, необходимо провести достаточно много измерений и усреднить их.

Небольшое число исследований отчасти извиняет тот факт, что весьма сходные результаты получены на трех различных типах бактерий, точно так же, как оказались весьма сходны результаты экспериментов по влиянию микроволн резонансной частоты на выживаемость разных типов бактерий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе [15] сообщается о согласованных усилениях двух независимых лабораторий, которые включали измерение диэлектрических свойств водных растворов кольцевых молекул ДНК в диапазоне частот 1–10 ГГц. Не было обнаружено резонансного поглощения или какой-либо формы усиленного поглощения. Эти данные сомнительны, поскольку в работе [1] исследовались именно водные растворы кольцевых ДНК, и было обнаружено, что возбужденные пикосекундным лазером молекулы ДНК излучают на частоте нескольких гигагерц.

В работе [16] при исследовании ДНК плазмид тоже не было выявлено резонансного поглощения в диапазоне от 5 до 20 ГГц. Однако, во-первых, собственные частоты крутильных колебаний спиралей ДНК зависят от длины кольцевых ДНК, которая весьма различается у разных бактерий. Например, для *E. coli* M17, *E. coli hcr' exr'*, для микобактерий эта частота выше 10 ГГц, для *E. coli* ATCC 25922 — равна 9.6 ГГц. Размеры плазмид варьируют от менее чем одной тысячи до 400–600 тыс. пар оснований, в десятки и сотни раз меньше, соответствующие частоты крутильных колебаний ДНК плазмид располагаются в диапазоне терагерц.

Во-вторых, как уже было показано выше, в клетке бактерии на излучение волн сантиметрового диапазона способны реагировать исключительно молекулы ДНК. Как уже было сказано, коэффициент в формуле (1) интегральным образом включает в себя, кроме жесткости компактифицированной ДНК, влияние ее окружения. В водных растворах это окружение отсутствует, поэтому коэффициент и частота будут иными.

Это наиболее важный момент, поскольку именно он позволяет связать пик поглощения с типом бактерии. Поэтому исследование может быть положено в основу метода идентификации различных типов бактерий и для диагностики бактериальных заболеваний.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит В.В. Новикову (Пермская фармацевтическая академия), В.А. Дробкову (Клинический фтизиопульмонологический медицинский центр в Перми) и И.Г. Вольхина (ПГНИУ) за помощь в работе.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей или животных в качестве объектов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. В. Аншелевич, А. В. Вологодский, А. В. Лукашин и М. Д. Франк-Каменецкий, Журн. эксперим. и теорет. физики, **66**, 2163 (1974).
2. O. A. Tiphlova and T. J. Karu, Photochem. Photobiol., **48** (1), 467 (1988).
3. Г. В. Козьмин и В. И. Егорова, Биомед. технологии и радиоэлектроника, № 3, 61 (2006).
4. B. M. Fischer, M. Walther, and P. Jepsen, Physics in Medicine and Biology, **47**, 3807 (2002). DOI: 10.1088/0031-9155/47/21/319.
5. T. Globus, I. Sizov, and B. Gelmont, Adv. Biosci. Biotechnol., **4**, 493 (2013) DOI: 10.4236/abb.2013.43A065
6. V. Garaj-Vrhovac, D. Horvat, and Z. Koren, Mutat. Res. Lett., **243** (2), 87 (1990). DOI: 10.1016/0165-7992(90)90028-I
7. P. Shaw, et al., Sci. Reports, **11** (1), 1 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-93274-w
8. В. Бинги, Принципы электромагнитной биофизики (Физматлит, М., 2011).
9. Б. Л. Ихлов, Ф. В. Мельниченко и А. Ю. Ощепков, Вестн. новых мед. технологий, **24** (2), 141 (2017).
10. Б. Л. Ихлов, А. А. Шурыгин и В. А. Дробкова, Туберкулез и болезни легких, **97** (1), 25 (2019). DOI: 10.21292/2075-1230-2019-97-1-25-27
11. A. A. Traves and J. M. T. Thompson, In *The Mechanics of DNA*, Ed. by J.M.T. Thompson (Theme Issue of Phil. Trans. Roy. Soc. A, **362** (1820), 1265) (2004).
12. T. Strick, J.-F. Allemand, V. Croquette, and D. Bensimon, Progr. Biophys. Mol. Biol., **74**, 115 (2000).
13. Б. Л. Ихлов, Вестн. новых мед. технологий, **25** (2), 121 (2018).
14. А. Н. Ковалева, И. Л. Маневич, А. А. Мусиенко и А. В. Савин, Высокомолекуляр. соединения. Сер. А, **51** (7), 1174 (2009).
15. C Gabriel, E. H. Grant, R. Tata, et al., Nature, **328** (6126), 145 (1987). DOI: 10.1038/328145a0
16. I. J. Bigio, T. R. Gosnell, P. Mukherjee, and J. D. Saffer. Biopolymers, **33** (1), 147 (1993). DOI: 10.1002/bip.360330114

Identification of Pathogenic Bacteria Using the Spectra of Native DNA Molecules**B.L. Ikhlov*****Perm State National Research University, ul. Bukireva, 15/1, Perm, 614998 Russia*

The purpose of detecting low-frequency (relative to infrared and ultraviolet) resonance absorption of an electromagnetic field in the centimeter wavelength range using DNA molecules at a frequency corresponding to the natural frequency of torsional vibrations of the native DNA helix is to find a relationship between the length of DNA (its spectrum) and the type of a bacterium. Instead of DNA solution, cultures of different bacteria that contained DNA were used and the resonance frequencies of torsional vibrations of the helices in DNA molecules were calculated for them. The cultures were placed in test tubes or in a cuvette and were subjected to microwave irradiation. Theoretical analysis was carried out with respect to the DNA reaction to external centimeter radiation and the resonant DNA frequencies of three types of bacteria such as *E. coli* M17, *M. avium* and *Mycobacterium tuberculosis* were determined. Peak absorption of the ultrahigh-frequency electromagnetic field by bacterial cultures was detected at frequencies close to the calculated natural frequencies of torsional vibrations of DNA helices of the said types of bacteria: 10.271 GHz, 10.317 GHz and 10.356 GHz, respectively.

Keywords: torsional vibrations, power flux density, electromagnetic field, microwave frequencies