



УДК 577.32+579.6; 577.323; 537.876.4; 615.849

## КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СПИРАЛЬНЫХ МОЛЕКУЛ

Ихлов Б. Л.

Пермский государственный национальный исследовательский университет;

Россия, Пермь, 614998 ул. Букирева, 15/1; [aos57@mail.ru](mailto:aos57@mail.ru)

### Аннотация

Проведен анализ результатов облучения ДНК, выделенной из лимфоцитов крови человека, электромагнитным полем миллиметрового диапазона. Показано, что колебания спиралей ДНК, вызванные миллиметровыми волнами не могут быть продольными. Найдена собственная частота крутильных колебаний спиралей молекул коллагена. Выведена общая формула, описывающая продольные колебания в спиральных макромолекулах. Теоретически доказано, что одноцепочечные разрывы в ДНК лимфоцитов под действием миллиметровых волн вызываются крутильными колебаниями спиралей молекул ДНК, собственные частоты которых совпадают с частотами микроволн, найдены резонансные частоты. Показано отличие крутильных колебаний одинарной РНК от колебаний ДНК, получена общая формула. Показано, что воздействие на резонаторы с собственной частотой в миллиметровом диапазоне вынуждающим электромагнитным полем сантиметрового диапазона вызывает субгармонический резонанс. Показано, что воздействие кратной частоты 10,022 ГГц на РНК covid-19 приводит к ее деструкции, облучение в импульсном режиме позволяет сократить время экспозиции до 1 часа.

**Ключевые слова:** резонанс, репликация, разрывы, белок, мощность, РНК, импульс

**Список используемых сокращений:** ОР – однонитевые разрывы, СВЧ – сверхвысокочастотный; ЭМП – электромагнитное поле, ППМ – плотность потока мощности

### Введение

В [1] и ряде других работ было доказано, что *in vitro* молекулы ДНК бактерий *E. coli*, *M. Avium* и *Mycobacterium Tuberculosis* способны поглощать сантиметровые волны электромагнитного поля (ЭДС). Это происходит, когда частота микроволновой ЭДС находится в резонансе с собственной частотой крутильных колебаний свободной спирали молекулы ДНК. В модели упругого стержня с использованием формализма Лагранжа и экспериментальных данных была получена общая формула для этих колебаний: Из лагранжева формализма частота крутильных колебаний спирали ДНК с двумя свободными концами определяется по формуле

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2G}{J}}$$

$G$  – жесткость,  $J$  – момент инерции,  $J = s(m_1 + m_2 + m_3 \dots + m_N)R^2$ ,  $R$  – радиус витка спирали,  $m_i$  – масса витка,  $s$  – число витков [2]. Жесткость определяется из эксперимента, в итоге получается формула:

$$f = 21,75BP^{-1/2}T\Gamma\zeta \quad (1)$$

где  $BP$  – число пар оснований [2]. Численный коэффициент 21,75 интегральным образом учитывает неоднородность цепи ДНК, ее компактизацию и ее окружение.

Явление возбуждения крутильных колебаний в ДНК является классическим, не квантовым по своей природе.

В результате возбуждения внешним полем крутильных колебаний малой амплитуды в молекулах ДНК резко увеличивается число односторонних разрывов (ОР) в ДНК, и бактерия погибает.

В экспериментах по воздействию резонансных частот было получено резкое снижение выживаемости *E. coli* ATCC 25922 (до 20%), полное уничтожение *M. Avium* и тысячекратное снижение выживаемости *Mycobacterium tuberculosis* H<sub>37</sub>R<sub>v</sub> (*Pasteur*) ATCC 25618 [1].

### Коллаген и ДНК лимфоцитов

Спиральные молекулы различных типов коллагена представляют собой левозакрученную спираль из трёх  $\alpha$ -цепей длиной 270-300 нм, с молекулярной массой 270-300 кДа, и образованные ими с помощью межмолекулярных сшивок фибриллы с длиной до 3200 нм. Один виток спирали  $\alpha$ -цепи содержит три аминокислотных остатка. Примем, что масса одного аминокислотного остатка – примерно 112 Да. Тогда в одной молекуле коллагена максимально 297 витков. В одном витке молекулы ДНК – 10 п.н., формула (1), выраженная через число витков  $n$ , будет иметь вид:

$$f = q / \sqrt{10n} \quad (2)$$

Данная формула является общей для всех спиральных молекул. Используя (2), получим частоту крутильных колебаний молекулы коллагена - примерно 452 ГГц.

В [3] было показано, что воздействие сантиметровых волн на ДНК лимфоцитов приводит к ОР спирали ДНК. Было изучено влияние сантиметровых волн на ДНК, выделенной из лимфоцитов. Использовались микроволновые генераторы: ГКЧ 53, R2-68, R2-69 мощностью 3 МВт. Образцы подвергались облучению в течение 10 минут на трех разных частотах. С увеличением частоты микроволнового излучения количество ОР молекул ДНК в лимфоцитах увеличивается по сравнению с контрольными образцами: при воздействии излучения частотой 3,5 ГГц на (32,3±0,9)% (первая точка кривой), при частоте 50 ГГц на (40,1±1,1)% (вторая точка кривой), при частоте 70 ГГц на (49,8±0,7)% (третья точка кривой).

Частоты 50 ГГц и 70 ГГц не могут возбуждать продольные колебания в молекулах ДНК лимфоцитов. Частота колебаний обеих цепей ДНК (одновременное сжатие-растяжение обеих цепей) пропорциональна  $(2k/M)^{1/2}$ , где  $k$  - коэффициент жесткости,  $M$  - масса ДНК. Оценки показывают, что частоты продольных колебаний на два порядка ниже. Нетрудно получить приблизительный коэффициент жесткости  $N/m$  и приблизительную резонансную частоту для модели с 35 парами нуклеотидов – 4 ГГц. Можно рассчитать жесткость для ДНК любой длины по формуле  $k_i = kl/li$ . Обозначим количество пар нуклеотидов в модели  $N_0$ , жесткость –  $k_0$ . Общая формула

$$f_i = (k_0 N_0 / 2m_0)^{1/2} / \pi N_i \quad (3)$$

где  $m_0$  - средняя масса пары оснований ДНК,  $N_i$  - количество пар оснований для  $i$ -го типа ДНК.

Если для *E. coli* с длиной цепи 5 млн пар оснований резонансная частота согласно (3) будет составлять около  $10^4$  Гц, то для ДНК лимфоцитов она соответствует диапазону мегагерц.

Зависимость количества ОР от частоты трех вышеперечисленных точек приблизительно укладывается на кривую

$$y = 0,003x^2 + 0,5x + 0,15 \quad (4)$$

Таким образом, 100% достигается на частоте примерно 160-200 ГГц.

Молекулярная масса ДНК лимфоцитов составляет  $3,5 \cdot 10^5 - 3,7 \cdot 10^6$  Да [4]. Для ДНК с молекулярной массой  $3,5 \times 10^5$  и, соответственно, числом пар оснований 507 частота продольных колебаний составляет около 1 ГГц, частота крутильных колебаний составляет около 1 ТГц, таким образом, даже с учетом погрешности определения молекулярной массы ДНК лимфоцитов, частота 200 ГГц, рассчитанная по модельной кривой из данных [3], не совсем удовлетворительно соответствует прямому расчету частоты крутильных колебаний спиралей ДНК около 300 ГГц по формуле (1).

Действительно, рассматриваемая кривая не может быть параболой, от почти нулевой точки до первой точки она быстро растет, затем растет крайне медленно, во второй точке рост заметно ускоряется, наконец, рост числа ОР по формуле (1) бесконечно растет с частотой. Кроме того, очевидно, что при нулевой частоте количество ОР, добавленное к обычному уровню, равно нулю, т.е. коэффициент  $c$  в уравнении модели также должен быть равен нулю. Математическое моделирование показывает существенную разницу с параболой. Это означает, что пара данных первой точки [3] некорректна. Частота 3,5 ГГц не может соответствовать никаким естественным колебаниям ДНК лимфоцитов.

На самом деле эти три точки принадлежат не одной, а трем разным кривым.

Спектр поглощения сантиметровых волн, снятый на культуре *E. coli* M17, показывает, что его форма – параболическая, не сходная со стандартной резонансной кривой – в виду соотношения  $d / L \ll 1$ , где  $d$  – диаметр спирали ДНК,  $L$  – ее длина. Поэтому для анализа данных [3] важно, чтобы спектр поглощения сантиметровых волн молекулами ДНК, поскольку длина спирали ДНК намного больше ее диаметра, имел форму перевернутой параболы, максимум которой является пиком поглощения. Поэтому было бы правильно аппроксимировать кривую роста числа ОР от частоты перевернутой параболой вида

$$y = 100 - a(x - b)^2 \quad (5)$$

Это означает, что при резонансе количество ОР достигает 100%. Затем, используя третью точку (70 ГГц), получаем по формуле (4), что резонансная частота лимфоцитов спирали ДНК ( $b$ ) приблизительно равна 310 ГГц, что близко к расчету, сделанному выше в соответствии с (1).

Для первой точки резонансная частота 6,4 ГГц, на этой частоте никаких продольных или крутильных колебаний от такой короткой ДНК быть не может, что еще раз показывает, что первая точка некорректна.

Для второй точки, 50 ГГц, резонансная частота иная,  $b = 188,5$  ГГц, так как ДНК разных лимфоцитов имеет разную молекулярную массу и, соответственно, длину. Этой частоте соответствуют 13320 пар оснований.

Таким образом, доказано, что ОР в ДНК, выделенной из лимфоцитов, возникают в результате возбуждения микроволнами в молекулах ДНК исключительно крутильных колебаний спиралей молекул.

И наоборот: установлено, что микроволны с частотой, равной собственной частоте крутильных колебаний любых спиралей ДНК, вызывают в них ОР.

То есть данные [3] подтверждают результаты [1, 2].

### Одинарные РНК

В большинстве одинарной РНК имеются короткие комплементарные последовательности, которые спариваются и образуют петли, поэтому в одиночных цепях постоянно образуются короткие внутримолекулярные двухцепочечные участки. Спаривание оснований приводит к образованию участков нуклеотидов в виде петель, спиральные участки образуют П-образные фрагменты, в которых связанные водородными связями антипараллельные последовательности нуклеотидов соединены минимум тремя нуклеотидами, образующими изгиб. Вследствие взаимодействия нуклеотидов РНК и их объединения в пары по принципу комплементарности в молекуле кроме петель возникают шпильки, шпильки с внутренней петлей, дуплексы с двумя выступами, псевдоузлы (две совмещенные особым образом шпильки), молотовидные рибозимы.

Таким образом, одинарная молекула РНК имеет вид беспорядочно свернутой цепи. Локальные конформации нуклеотидов близки к оптимальной канонической для 85% нуклеотидов, 15% находятся в одной из более напряженных канонических конформаций, обеспечивая согласованность локальных и дальних по цепи взаимодействий [5, 6].

Поскольку протяженность спирализованных участков в одноцепочечной РНК невелика, а сами спирали несовершенны, они довольно легко разрушаются.

Момент инерции витка одинарной спирали РНК  $J$  вдвое меньше, чем у ДНК, следовательно, вдвое меньше  $BP$ . Соответственно, собственная частота для РНК в  $2^{1/2}$  больше частоты для ДНК. Может показаться, что и жесткость одинарной спирали РНК вдвое меньше, поэтому формула для РНК не должна отличаться от формулы для ДНК. Однако в ДНК две связанные спирали вращаются друг относительно друга. Вероятность того, что отклонение угла спирального вращения от равновесного для этих сечений, разделенных расстоянием  $L$ , составит  $\Delta\varphi$ , равна  $P(\Delta\varphi) = Z \exp[-q(\Delta\varphi)^2 / 2LkT]$ ,  $Z$  - нормировочный множитель,  $k$  - постоянная Больцмана,  $q$  - константа, определяющая величину осевой закрутки,  $T$  - абсолютная температура,  $L$  - расстояние между соседними парами оснований. Амплитуда флуктуаций угла спирального вращения в двойной спирали:  $\sqrt{\langle \Delta\varphi^2 \rangle} = \sqrt{LkT / q}$ . Константа торсионной жесткости  $q$  двойной спирали для вращения одной цепи ДНК относительно другой соответствует удвоенной работе, которую надо совершить над стержнем единичной длины, повернув один конец относительно другого вокруг оси стержня на один радиан. Оценки величины  $q$  лежат в интервале  $(1,5 \div 3) \cdot 10^{-19}$  эрг·см, наиболее надежные оценки, основанные на использовании свойств коротких кольцевых ДНК, дают значение  $q$ , равное  $3 \cdot 10^{-19}$  эрг·см, оно отвечает среднеквадратичной амплитуде флуктуаций угла спирального вращения в 4 градуса. Т.е. две спирали ДНК реагируют на микроволны по отдельности, жесткость в (1) при переходе от ДНК к РНК относительно крутильных колебаний можно считать неизменной, следовательно, множитель  $\sqrt{2}$  в формуле для РНК сохраняется.

Азотистое основание в РНК, комплементарное аденину, не тимин с молярной массой 126,11334 г/моль, как в ДНК, а урацил с молярной массой 112,08676 г/моль (неметилированная форма тимина). То есть, масса и, соответственно, момент инерции витка спирали меньше.

Воздействию внешнего электромагнитного поля на неупорядоченную РНК скручивает не спиральные участки цепи в спираль, поэтому формула (1) справедлива и для одинарных РНК.

В итоге имеем:

$$f_{РНК} = 31,196N^{-1/2}$$

где  $N$  - число оснований (не пар). Для РНК с двойной спиралью

$$f_{РНК} = 22,0589N^{-1/2}$$

где  $N$  – число пар оснований.

Собственные частоты крутильных колебаний ДНК бактерий лежат в диапазоне СВЧ. Поскольку длина цепи РНК существенно меньше, собственные частоты крутильных колебаний цепей РНК лежат в КВЧ диапазоне.

### Кратные частоты

В связи с тем, что миллиметровые волны экранируются раствором, содержащим ДНК или РНК, затруднительно использовать электромагнитное поле миллиметрового диапазона.

Рассмотрим вынужденные крутильные колебания пружины:

$$\ddot{\varphi} + 2\beta\dot{\varphi} + \omega_0^2\varphi = f \cos \omega t$$

где  $\varphi$  - угол закручивания пружины,  $\omega_0$  - собственная частота,  $\omega$  - частота вынуждающей силы,  $f$  - амплитуда вынуждающей силы,  $\beta$  - коэффициент трения.

Общее решение ищется в виде  $\varphi_1 = a \cos \omega_0 t$ , частное - в виде  $\varphi_2 = b \cos \omega t$ . Подставляя в уравнение, в отсутствие трения получаем:

$$\varphi = a \cos \omega_0 t + [f / (\omega_0^2 - \omega^2)] \cos \omega t$$

Т.е. система совершает колебание, являющееся совокупностью двух колебаний.

При наличии трения первый член экспоненциально убывает со временем.

При совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой осциллятора решение уравнения имеет вид:

$$\varphi = a \cos \omega t + (f / 2\omega)t \sin \omega t$$

То есть, при резонансе амплитуда колебаний линейно растет со временем.

При наличии трения осциллятор совершает колебания не с собственной частотой, но с частотой  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ . Эту систему можно рассматривать как систему с вынуждающей силой  $f = -2\beta\dot{x}$ . Если трение велико, частота колебаний может быть кратной собственной частоте при определенных дискретных коэффициентах трения:

$$\beta = \sqrt{3}\omega_0 / 2; \sqrt{8}\omega_0 / 3; \sqrt{17}\omega_0 / 4...; \omega = \omega_0 / 2; \omega_0 / 3; \omega_0 / 4...$$

Резонанс возникает также на субгармониках, на частотах вынуждающей силы, которые кратны собственной частоте, например,  $\omega = \omega_0 / 2, \omega = \omega_0 / 3, \omega = \omega_0 / 4...$  и т.д. С увеличением кратности интенсивность резонанса быстро убывает, чем больше кратность, тем медленнее нарастание амплитуды [7]. Следовательно, время облучения должно быть увеличено.

Субгармонический резонанс является частным случаем параметрического резонанса. Если колебания описываются уравнением Хилла-Матье, резонанс возникает на частоте, в  $n$  раз меньше удвоенной собственной частоты:

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2(1 + a \cos \omega t)\varphi = 0; \omega_{рез} = 2\omega_0 / n$$

см. [8]. «Вынуждающая сила» имеет вид  $f = -a\omega_0^2[\cos \omega t]x$ . Тогда, например, для 1-й субгармоники:

$$f \approx [\cos \omega t] \cos \omega_0 t \approx \cos(\omega_0 / 2) + \cos(3\omega_0 / 2)$$

То есть, кратные частоты являются особыми точками уравнения. Таким образом, под действием вынуждающей силы с частотой в  $n$  раз меньше собственной, амплитуда колебаний растет до максимальной, превышающей амплитуду свободных колебаний осциллятора.

Субгармонические резонансы для перевернутого маятника с возбуждением частот в  $n$  раз меньше собственной рассмотрены также в [9].

Общий вид субгармонических колебаний при резонансе:

$$\varphi = a \cos(\omega_0 t / n) + g(n)(fn / 2\omega_0)t \sin(\omega_0 t / n)$$

где функция  $g(n)$  убывает с ростом  $n$  быстрее, чем растет  $n$ .

Таким образом, для воздействия на короткие макромолекулы можно использовать сантиметровые волны с частотами порядка 10 ГГц, частотам которых кратны собственные частоты миллиметрового диапазона.

Резонанс возникает на всех частотах вынуждающей силы, которые удовлетворяют соотношению  $m\omega - n\omega_0 = 0$ , где  $m, n$  – целые числа. В нашем случае необходимо, чтобы отношение частот было полуцелым:  $f_0 = 3nf/2$ , где  $n = 1, 2, 3...$

### Экспериментальное подтверждение

Для подтверждения теоретически полученных результатов в качестве объекта исследования была выбрана ДНК амебоцитов гемолимфы жесткокрылых *Nauphoeta cinerea* и паукообразных *Dermacentor silvarum*. Известно, что увеличение числа ОР ведет к апоптозу клеток, что способно вызвать гибель членистоногих. Поэтому по гибели членистоногих можно судить о действии ЭМП на рост числа ОР в ДНК амебоцитов их гемолимфы. Обнаружено, что частота 8,054 ГГц вызывала 100%-ю гибель членистоногих, прочие частоты влияния не оказывали [10].

Рост (Growth) числа гибели членистоногих в зависимости от частоты  $\omega$  изображен на Рис. 1.

Рис. 1

Характерно, что один и тот же эффект наблюдался и с *Nauphoeta cinerea*, и с *Dermacentor silvarum*. Частоте 8,054 ГГц с высокой степенью точности кратна частота 298 ГГц, ей соответствует собственная частота крутильных колебаний ДНК длиной 5330 п.н.

Для случая одинарных РНК использовались положительные пробы covid-19. В 14 экспериментах показано, что микроволны на расчетной частоте 10,022 ГГц полностью деструктурируют молекулы РНК covid-19. Отбирались контрольная и экспериментальная положительные пробы, время экспозиции для экспериментальной пробы – 24 часа. Для проверки использовался RT-LAMP-тест.

Однако значительно более эффективным способом увеличения числа однонитиевых разрывов коротких спиральных макромолекул являются вынужденные колебания при периодическом импульсном воздействии. Математическое моделирование с помощью Матлаб при соотношении частот вынуждающей силы и собственной 1/10, показывает на виртуальном осциллографе, что уже на 4-м импульсе амплитуда колебаний удваивается:

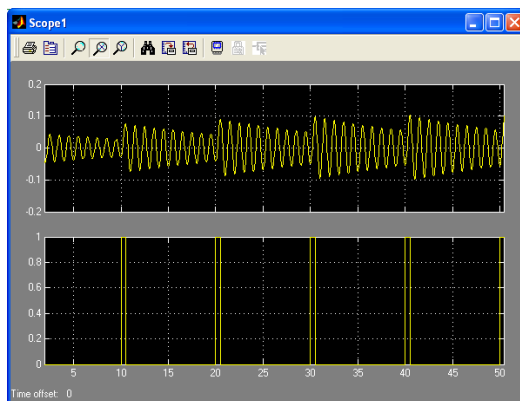


Рис. 2.

Наиболее эффективная форма сигнала генератора – знакопеременный меандр с высокой скважностью вида

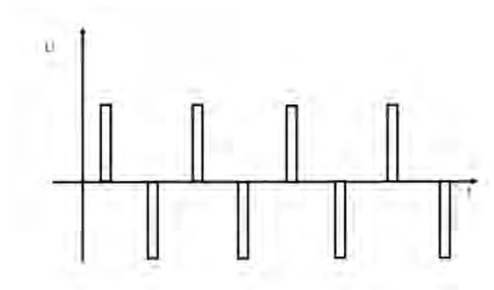


Рис. 3.

В 6 экспериментах с контролем с положительными пробами covid-19 показано, что использование импульсной технологии позволяет сократить время облучения до 1 часа.

Источником излучения являлся СВЧ-генератор Agilent Technologies E82570 1, для усиления сигнала до 1 W использовался усилитель мощности Agilent Technologies E82570. Плотность потока мощности СВЧ-излучения составляла 2,5 мВ/см<sup>2</sup>, скважность  $S = 10$ .

### Обсуждение

Незначительное отклонение частоты генератора от расчетной оказывается значительным, потому что оно умножается на кратность 37, если отклонение в 0,5% является значительным для ДНК с резонансной частотой около 10 ГГц, то в этом случае отклонение составляет (0,054 x 37) ГГц, то есть около 0,7% от 298 ГГц.

В случае репликации ДНК или РНК параметры их спиралей меняются со временем, соответственно, меняется собственная частота их крутильных колебаний. В таком случае можно использовать частную модуляцию сигнала генератора. Уравнение для углового отклонения витков спирали  $x$  записывается следующим образом:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \omega_1^2 x_0 \sin \omega_1 t + \omega_2^2 x_1 \sin \omega_2 t$$

Если  $x_0 = x_1 = 1$  уравнение записывается проще, возникает смещение по времени. Для наглядности пусть собственная частота - 10 ГГц, основная частота генератора – 10,1 ГГц, модуляция – 150 МГц. Тогда

$$\ddot{x} + 100x = 102 \sin[2\pi(10,1t + 3t^2)]$$

В результате получается смещение частоты колебаний от вынуждающей частоты к собственной:

$$x = c_1 \cos 10t + c_2 \sin 10t - c_3 [0,205581(3,46322t + 4,90807) \sin 10t - 1,02054(3,46322t + 6,7463) \sin 10t - 1,4582(3,46332t + 4,90807) \cos 10t - 1,06165(3,46322t + 6,7463) \cos 10t + c_4 [1,4582(3,46322t + 4,90807) \sin 10t - 1,06165(3,46322t + 6,7463) \sin 10t - 0,205581(3,46322t + 4,90807) \cos 10t + 1,02054(3,46322t + 6,7463) \cos 10t$$

Таким образом, при частотно модулированном сигнале, основная частота которого немного отличается от собственной, возникает резонанс с увеличением амплитуды колебаний, ограниченным потерями энергии.

### Заключение

В анализе [3] доказано, что авторы получили не одну зависимость роста числа одностранных разрывов ДНК от величины частоты, а три, причем данные для одной зависимости – по-видимому, некорректны.

Данный анализ был необходим, чтобы уяснить: 1) действие микроволн резко увеличивает число одностранных разрывов ДНК, 2) механизм этого действия – возбуждение крутильных колебаний спирали ДНК, 3) из данных [3] можно найти резонансные частоты для крутильных колебания коротких ДНК лимфоцитов.

Параметры РНК covid-19 соответствуют параметрам ДНК лимфоцитов, соответственно, собственные частоты крутильных колебаний их спиралей лежат в диапазоне десятков гигагерц. Волны этого диапазона тормозятся кожным покровом организма человека. Однако при использовании субгармонического резонанса можно уменьшить частоты в целое число раз, данные частоты попадают в сантиметровый диапазон с частотами порядка 10 ГГц.

Поскольку микроволны данного диапазона нетеплового уровня плотности потока мощности свободно проходят сквозь тело человека, полученные результаты могут быть использованы в медицине [11, 12].

Автор выражает благодарность доценту пермского филиала Централизованной клинико-диагностической лаборатории П. В. Попову и к.ф.м.н. ПГНИУ И. Л. Вольхину за помощь в работе.



## Литература

1. Б. Л. Ихлов, А. А. Шурыгин, В. А. Дробкова. Возможность бактерицидного действия микроволн на штаммы *Mycobacterium avium* и *Mycobacterium tuberculosis*. Туберкулез и болезни легких. **97**(1), 25-27 (2019). <https://doi.org/10.21292/2075-1230-2019-97-1-25-27>;  
<https://www.tibl-journal.com/jour/article/view/1216>
2. Б. Л. Ихлов, А. В. Мельниченко, А. Ю. Ощепков. Действие высокочастотного электромагнитного поля на микроорганизмы. Вестник новых медицинских технологий. **24**(2), 141-146 (2017).
3. Е. Е. Текуцкая, Р. В. Василиади. Структурные повреждения ДНК лимфоцитов периферической крови человека под воздействием физических факторов. Экология человека. 12, 9-14 (2017).
4. Н. О. Туаева, З. И. Абрамова. Внеклеточная ДНК в кровотоке человека. Ученые записки Казанского университета. 149(2), 24-31 (2007).
5. Yue Wan, Michael Kertesz, Robert C. Spitale, Eran Segal, Howard Y. Chang. [Understanding the transcriptome through RNA structure](#). *Nat Rev Genet.* **12**, 641-655 (2011).
6. F. H. D. van Batenburg. [PseudoBase: structural information on RNA pseudoknots](#). *Nucleic Acids Research.* **29**, 194-195 (2001).
7. В. С. Доев, Ф. А. Доронин. Резонансные режимы в линейных колебательных системах с кратными частотами. Известия Петербургского университета путей сообщения. 1, 17-22 (2006).
8. А. М. Федорченко. *Теоретическая механика*. (Высшая школа, Киев, 1975).
9. Бутиков Е. И. Маятник с осциллирующим подвесом (субгармонические резонансы). Компьютерные инструменты в образовании. 1, 31-49 (2011).
10. Б. Л. Ихлов, И. Л. Вольхин, А. Ю. Ощепков. О механизме действия микроволн на членистоногих. Биофизика. **67**(2), 327-332 (2022). <https://elibrary.ru/item.asp?id=47997849>
10. Б. Л. Ихлов, И. Л. Вольхин, А. Ю. Ощепков. Способ подавления развития COVID-19 и ВИЧ нетепловой резонансной СВЧ-терапией. Заявка от 19.7.2021, входящий №044885, регистрационный №2021121471.
11. В. L. Ikhlov. Distribution and disinfection of COVID-19. Proceedings of the International Conference "Process Management and Scientific Developments" (Birmingham, United Kingdom, October 14, 2020). 1, 104-110.