

СПЕКТРЫ ДНК. ОБЗОР

Б.Л. ИХЛОВ

ФГУП «ОКБ «Маяк», ул. Даницина, 19, г. Пермь, 614068, Россия, e-mail: officemayak@mail.ru

Аннотация. Дан краткий обзор моделей ДНК, ее спектров, а также уровней компактизации молекулы.

Показано, что, помимо резонанса, возникающего при облучении ДНК полем, частота которого совпадает с собственной частотой крутильных колебаний спирали ДНК, при наличии репликации возникает дополнительный резонанс, связанный с увеличивающимся со временем моментом инерции спирали ДНК.

Проанализированы данные о резонансах колебаний ДНК в ультрафиолетовом диапазоне. Сделан вывод, что эти резонансы вызваны не только квантовыми переходами, но также связаны с продольными колебаниями нуклеосом в олигосомах. На основе предыдущих экспериментальных данных построена модель этих колебаний. Получены формулы для амплитуды и частоты данных колебаний.

Приведено обоснование возможности расположения продольных колебаний нуклеосом в ультрафиолетовом диапазоне. Показано, что при числе олигосом больше двух система олигосом перестает совершать связные колебания, они колеблются сами по себе, с разными амплитудами. Получена частота их колебаний.

Предположено, что могут возникнуть крутильные колебания петель в точках прикрепления к ядерному матриксу и дополнительные частоты из-за взаимодействия с ядерным матриксом.

Даны практические выводы из исследований спектров ДНК.

Ключевые слова: резонанс, лечение, база данных, ДНК, электромагнитные спектры.

Введение. Изучение спектров ДНК актуально в двух планах: в плане лечения различных заболеваний с помощью электромагнитного поля и в плане защиты организма человека от его негативного воздействия.

Физические параметры компактизации ДНК. Длина спирали ДНК человека в среднем – 5 см. Общая длина всех молекул ДНК в ядре одной половой клетки человека составляет около 102 см. Диаметр витка ДНК – 2 нм, размер шага спирали = 3,4 нм = $3,4 \times 10^{-9}$ м. Масса одной пары оснований – 650 дальтон. На один виток спирали приходится 10,5 пар оснований. Спираль ДНК свернута во вторичную спираль, которая, в свою очередь, свернута в третичную. В формировании вторичной спирали участвуют водородные связи, электростатические, Ван-дер-ваальсовы, стекинг-взаимодействия.

Уменьшение размеров ДНК проходит в несколько этапов:

1) накручивание ДНК на бусовидные частицы, нуклеосомы, с плотностью упаковки около 6 (67 нм ДНК упакованы в частицу длиной около 11 нм), с образованием нуклеосомной нити диаметром 10 нм. Суммарная молекулярная масса одной нуклеосомы оценивается в 262 кДа (108 кДа приходится на гистоны,

130 кДа – на ДНК, 24 кДа – на небольшие негистоновые белки). 146 п.н. ДНК приходится на октамер, 50 п.н. – на линкер. В S-фазе ДНК освобождается от гистоновых октамеров.

2) Компактизация нуклеосомной нити, закручивание серий бус в спиральные (соленоидные или зигзагообразные) фибриллы, структуры с образованием волокон размером около 30 нм, которые присутствуют и в интерфазном хроматине, и в митотических хромосомах. Длина ДНК уменьшается еще в 40 раз. На один виток вторичной спирали может приходиться по 6 нуклеосом. Существует несколько моделей упаковки нуклеосомной нити: соленоидная модель, модель суперспирали (то же, но гистон H1 локализован на периферии или между нуклеосомами по всей длине спирали), кросс-линкерная модель (зигзагообразная структура вдоль продольной оси в виде двойной суперспирали; нуклеосомы – на периферии, поперёк продольной оси расположены линкерные участки), ленточная модель (лента, закрученная в суперспираль).

3) Сворачивание фибрилл в петли длиной 50-200 тысяч пар нуклеотидов (п. н.), концы которых закрепляются на белковом скелете ядра (ядерном матриксе), плотность упаковки

ДНК возрастает до 700-1000. Число петель (и прикреплений) у ДНК человека – порядка 10^3 . Размеры (диаметр или двойная большая полуось) клеточных ядер – от 10^3 нм (у некоторых простейших) до 10^4 нм у человека и до 1 мм (в яйцах некоторых рыб и земноводных). Молекулярная масса ядра клеток человека – порядка 2×10^{14} Да.

Наконец, возникает хромонема, нить толщиной 0,1-0,3 мкм, закрученная в плотную спираль. В метафазе в ходе последующего уменьшения диаметр хроматиды снижается до 0,7 мкм.

Далее с участием негистоновых белков из спиралеобразных форм образуются глобулярные структуры, хромомеры, с размерами 0,1-0,2 мкм. Конечная стадия компактизации в хроматин (нуклеопротеидный комплекс) – хромосома, толщиной 1,4 мкм. Перед митозом, при образовании митотических хромосом, хромосомная ДНК периодически меняет длину и уменьшается в 10^5 раз по сравнению с линейной длиной ДНК. У человека уменьшение размера между хромосомой в интерфазе и хромосомой в митозе составляет 4-50 раз.

Вокруг нуклеосом ДНК оборачивается дважды, при этом длина цепи сокращается в 6-7 раз. Вдоль спирали ДНК нуклеосомы объединены в олигомеры: димеры, тримеры, тетрамеры и т.д., до 15 нуклеосом и выше. Длины олигонуклеосомных фрагментов кратны величине, называемой нуклеосомным повтором. Нуклеосомный повтор складывается из фрагмента ДНК т.н. минимальной нуклеосомы (устойчивой к гидролизу) строго постоянной длины в 146 п.н. и межнуклеосомной ДНК – линкера, длиной 50 п.н. Мономерные нуклеосомы содержат ДНК (~200 п.н. у млекопитающих), связанную с гистоновым октамером. Октамеры – белковые компактные частицы, форма которых похожа на диск, сплюснутый эллипс, с массой 250 000-300 000 Да. Общая масса ДНК и белка, включая H1, в расчете на нуклеосому составляет около 262 000 Да. Радиус вращения гистонового октамера – 3,2 нм, радиус вращения ДНК-компонента – 5,2 нм. Дополнительные 2 нм – из-за спирали ДНК.

Электромагнитные спектры ДНК. Спектры ДНК интерпретируют с помощью ковалентно-оптической модели, в модели упругого стержня, в модели двух упругих слабо взаимодействующих стержней, свернутых в спираль, в модели, учитывающей, что каждая из спиралей

ДНК состоит из сахаров, фосфатов и оснований, а также в динамической теории кристаллической решетки [45], в модели молекулярной динамики, в квантовых моделях (модели Фрелиха и др.). Вопрос о солитонах Давыдова и экситонах в цепи ДНК как решениях нелинейного уравнения Шредингера [2] пока остается дискуссионным. Поглощение волн молекулами ДНК можно изучать как непосредственно, так и путем воздействия, например, на микроорганизмы, полагая, что такие величины, как выживаемость, напрямую связаны с действием внешнего поля на ДНК.

1) Низко- и среднечастотный радиодиапазон.

2) СВЧ. Об СВЧ-спектре ДНК указывается в [2]. СВЧ-спектр ДНК исследован в [1,11-13,16,17]. В модели упругого стержня обнаружено, что действие на ДНК *E. coli* в период S-фазы СВЧ-поля с частотой, резонансной собственной частоте крутильных колебаний ДНК, приводит к прекращению репликации и гибели клетки. Собственная частота обратно пропорциональна квадратному корню из момента инерции спирали ДНК, $f = k_0 N^{-1/2}$, где N – число пар нуклеотидов в ДНК, $k_0 = 21,75$ ТГц [12].

3) КВЧ, миллиметровый диапазон. Влияние КВЧ на ДНК не исследовано.

4) Терагерцовый (субтерагерцовый) диапазон исследован в [34-38,40-43,50,51]. В [35] показано, что для каждого из оснований ДНК есть линия поглощения в ТГц-диапазоне, которая, как считают авторы [47], есть резонанс водородных связей. В экспериментах с ДНК сельди (Канада) в водном растворе обнаружено 7 линий поглощения в водном растворе и 5 линий в спиртовом растворе, из них совпадают две линии, 0,712 ТГц и 0,665-0,667 ТГц [33]. Частоты 0,368; 0,623 (0,625); 0,662 (0,665) ТГц авторами были идентифицированы как собственные частоты ДНК. Частоты 0,315; 0,415; 0,519 (0,520); 0,711 (0,712) ТГц, близкие к линиям поглощения бактериальной ДНК [39], авторами были отнесены к конформным колебаниям, т.к. они были получены для другого типа ДНК с разными растворителями. Частоту 0,667 ТГц авторы связали с взаимодействием ДНК с водой, т.к. эта частота совпала с резонансом бактериальной ДНК, тоже растворенной в воде. Частоты 0,3 и 0,9 ТГц идентифицированы не были. Авторы также указывают, что резонансы в терагерцовой области связаны с коллективными колебаниями больших групп молекул в ДНК.

5) **ИК.** Данные об ИК-спектрах ДНК обобщены в [8], линии поглощения связаны с колебаниями отдельных связей между атомами [32].

Тем не менее, дневной свет стимулирует размножение микроорганизмов. Можно предположить, что присутствующий в дневном свете низкочастотный ультрафиолет активирует ДНК.

6) **УФ.** Поглощение электромагнитных волн молекулой ДНК в УФ-спектре (10-400 нм) обусловлено квантовыми переходами между электронными уровнями. Система электронных уровней ДНК формируется уровнями оснований, которые образуют зоны. Ультрафиолет поглощается азотистыми основаниями, их пуриновыми и пиримидиновыми кольцами. Возбуждение благодаря обобщенным π -связям мигрирует по всей длине ДНК. Поэтому квантовый выход фотохимического разрушения оснований весьма мал, для фотохимической реакции необходимо поглощение сотен квантов каждым основанием. Полоса поглощения УФ молекулами ДНК – от 160 нм до 315 нм. Максимум поглощения молекулы ДНК в УФ-спектре – 253,7 нм, оказывает наибольшее, разрушающее влияние на ДНК, имеет ярко выраженный резонансный характер; минимум – около 230 нм.

Кроме оснований близкий пик в УФ-спектре 256 нм имеет 1,3-циклогексадиен. Однако есть еще структуры в клетке, связанные с ДНК, поглощающие ультрафиолет на близкой длине волны, 260 нм.

На 260 нм обнаружен максимум поглощения гистоновых олигомеров, см. табл., составленную из обработанных данных [21], где указаны лишь относительные величины амплитуд, без единиц измерения. Табл. демонстрирует зависимость поглощения УФ от числа объединенных мономеров.

Таблица

Поглощение УФ фрагментами молекулы ДНК (олигомерами) в зависимости от числа гистоновых мономеров

Число нуклеосом	1	2	3	4
поглощение	3	2	1,3	0,9

Анализ. Ниже мы будем пользоваться соленоидной моделью, с той модификацией, что в модели на каждый шаг спирали фибриллы приходится 6 нуклеосом, а мы ввиду объединения нуклеосом в олигомеры перейдем к более реальной структуре, где число нуклеосом

на виток вторичной спирали не является постоянным.

1) **Низко- и среднечастотный радиодиапазон.** Частота колебаний обеих цепей ДНК (одновременное сжатие-растяжение обеих цепей) определяется формулой $f = \sqrt{2k/M} / 2\pi$, где k – коэффициент жесткости, M – масса ДНК.

Численные эксперименты проводились с ДНК случайной нуклеотидной последовательности различной длины от 15 до 35 нуклеотидных пар. Учитывались Ван-дер-Ваальсовы, электростатические, торсионные потенциалы стандартных углов вращения и присутствие водородных связей. Модель двухнитевой ДНК при растяжении за концы 5' с суммарной силой в 10 пН растянулась в пределах 20% [27]. Обозначим число нуклеотидных пар в модели N_0 ; жесткость – k_0 .

Отсюда легко получить приближенный коэффициент жесткости 3×10^{-4} Н/м и ориентировочную резонансную частоту для модели – 4 ГГц. Можно рассчитывать жесткость для ДНК любой длины по формуле $k_i = kl / l_i$.

потенциалы стандартных углов вращения и присутствие водородных связей. Модель двухнитевой ДНК при растяжении за концы 5' с суммарной силой в 10 пН растянулась в пределах 20% [27]. Обозначим число нуклеотидных пар в модели N_0 ; жесткость – k_0 . Отсюда легко получить приближенный коэффициент жесткости 3×10^{-4} Н/м и ориентировочную резонансную частоту. Обозначим число нуклеотидных пар в модели N_0 , жесткость – k_0 . Общая формула $f_i = \sqrt{k_0 N_0 / 2m_0} / \pi N_i$, где m_0 – масса пары оснований ДНК, N_i – число пар оснований для i -того типа ДНК. Для *E. coli* с длиной цепи 5 млн пар оснований резонансная частота будет порядка 10^4 Гц. Для человеческих ДНК частота – на два порядка ниже. Однако для прикрепленных к ядерному матриксу кольцах фибрилл с 50-200 тыс. парами оснований, с учетом гистоновых вкраплений – частота окажется в длинноволновом диапазоне – порядка сотен килогерц. Таким образом, радиоволны могут возбуждать в ДНК человека продольные колебания. Пресман высказал предположение, что именно развитие радио обусловило такой феномен, как акселерация [26]. Можно также предположить, что радиоволны могут экспрессировать гены, связанные с ростом, *CDH13*, *NRXN1*, *HMG2* и другие.

Радиодиапазону могут соответствовать и колебания одной цепи ДНК относительно другой.

2) СВЧ. В [2] отмечается, что собственные частоты крутильных колебаний ДНК могут попадать в диапазон в районе 12 ГГц с шириной полосы от 10 до 10 ГГц, возбуждение их внешним полем может привести из-за топологических свойств цепи к локализации изгиба за счет раскручивания, и, следовательно, к разрыву молекулы; модель предсказывает зависимость эффективности внешнего поля от соотношения частоты ЭМП и длины цепи.

Однако в [11-13] показано, что собственная частота крутильных колебаний ДНК зависит от длины спирали ДНК, потому по величине она колеблется для разных клеток. Для бактерий она порядка 10 ГГц, у человека – от 1,91 до 4,29 ГГц. Кроме того, длительность необходимой экспозиции поля для снижения выживаемости бактерий превосходит клеточный цикл, потому никакого разрыва ДНК внешним полем не происходит, модель неверна. Внешнее поле при совпадении частоты поля с собственной частотой колебаний ДНК (формула указана выше) возбуждает в молекуле крутильные колебания, которые в S-фазе препятствуют репликации ДНК, вследствие чего после нескольких «неудачных» подготовок к митозу (шести клеточных циклов) клетка погибает.

Если же внешнее поле включено после того, как началась репликация, момент инерции ДНК изменяется. Момент инерции ДНК J можно записать через начальный J_n в виде: $J = J_n + ct$.

Диссипация начинает играть роль, т.к. возникает порядка 10^6 репликационных вилок, вращающихся в первом приближении с постоянной скоростью 140 оборотов в секунду. В виду этого для вывода уравнения движения в классическом приближении необходимы уравнения Лагранжа 2-го рода. Поскольку собственная частота порядка 10^9 ГГц, начинает играть роль квадратичный член в разложении силы трения по скоростям, аналогично уравнениям аэродинамики. Феноменологические уравнения для крутильных колебаний можно записать в виде:

$$(J_n + ct)\dot{\varphi}_1 + c\dot{\varphi}_1 + g_0\varphi_1 + c_0\dot{\varphi}_1^2 - G(\varphi_2 - \varphi_1) = 0;$$

$$(J_n + ct)\dot{\varphi}_2 + c\dot{\varphi}_2 + g_0\varphi_2 + c_0\dot{\varphi}_2^2 + G(\varphi_2 - \varphi_1) = 0,$$

где g_0, c_0 – константы, характеризующие диссипацию.

Если пренебречь диссипацией, уравнения запишутся следующим образом: $(1+k\tau)\dot{\varphi} + k\dot{\varphi} + \varphi = 0$.

Введены безразмерное время $\tau = \omega_0 t$, $\omega_0^2 = 2G/J_n$, и безразмерный коэффициент $k: c/J_n = k\omega_0$

Второй член – квазидиссипативный, роль диссипации выполняет увеличение момента инерции (снижение амплитуды колебаний). При $k \ll 1$ частота линейно снижается.

При наличии диссипации квадратичный член по скорости приводит к уравнению Риккати: $\ddot{u} = (ax - b)u$. где x, u – переопределенные время и угол. Отсюда уже можно видеть, что репликация уменьшает собственную частоту. Появляется второй резонанс, что и было получено в экспериментах с *E. coli* ATCC 25 992: кроме частоты 9,6 ГГц, при которой выживаемость бактерий резко падает, тот же эффект наблюдается на частоте 9,2 ГГц. Решение имеет вид: $u = c_1 Ai(\frac{ax - b}{a^{2/3}}) + c_2 Bi(\frac{ax - b}{a^{2/3}})$, где Ai – функция Эйри, Bi – отличающаяся по фазе на $\pi/2$ Bi -функция Эйри, описывающие синусоидальные колебания с увеличивающейся со временем амплитудой и уменьшающейся со временем частотой.

Необходимо отметить, что полоса поглощения СВЧ-волн молекулами ДНК весьма узкая. Исходя из стандартного отношения зависимости амплитуды A от удаления вынуждающей частоты w от собственной w_0

$$\ddot{\varphi} + a_0\dot{\varphi} + b_0\varphi = F(t) \quad F(t) = F_0 \cos \omega t \quad \varphi = A \cos \omega t; \quad (1)$$

$$A = k F_0 \left((w_0^2 - w^2)^2 + b^2 w^2 \right)^{-1/2}; \quad b = a_0 / 2m$$

(см. [20]) и из коэффициента трения в законе Стокса $6\pi r^2 \eta$ в модели [14] (r – радиус витка ДНК, η – динамическая вязкость), можно определить, при каком отклонении частоты поля от резонансной амплитуда снижается в e раз,

$$A_2 = e^{-1} A_1, \quad \omega - \omega_0 = (e^2 - 1)^{1/2} b,$$

b – коэффициент при диссипативном члене. Учитывая, что $r = 10^{-9}$ м, $\eta = (2 \div 50) 10^3$ н·сек / м², полный виток спирали состоит из 10 пар нуклеотидов, молекулярная масса одного нуклеотида – примерно 0,345 кг/моль, следовательно, $2m$ порядка 10^{-24} кг. Полагая фактор Перрена равным 10^0 , получаем отклонение частоты от резонансной порядка 10^5 Гц.. Или 10^4 пар нуклеотидов при 10^8 пар в ДНК. То есть, для частоты порядка 10^9 поглощения ДНК волны СВЧ достаточно острый, при отклонении от него поглощение быстро затухает. Следовательно, СВЧ ЭМП будет действовать исключительно на

конкретную ДНК, не задевая остальные, отличающиеся от конкретной, в соответствии с указанной выше формулой $f = k_0 N^{-1/2}$ на порядка 1000 пар нуклеотидов для человеческих ДНК, или $10^{-5}\%$.

Узость полосы поглощения позволяет использовать СВЧ нетеплового уровня для подавления репликации ДНК болезнетворных бактерий, что позволит разработать новые методики лечения, например, при заражении стафилококком *Staphylococcus aureus subsp. Aureus* или туберкулезными палочками *Mycobacterium tuberculosis complex*.

Для крутильных колебаний вторичной спирали ДНК сохраняется вид последней формулы. Но с учетом того, что длина ДНК уменьшилась в 40 раз, радиус витка возрос в 15 раз, а общая масса возрастает примерно вдвое, получим: $f_2 = 0,28k_0 N^{-1/2}$.

Аналогичный вид имеют и формулы для продольных колебаний ДНК и вторичной структуры ДНК, разница лишь в коэффициентах: $f_1 = k_1 N^{-1/2}$; $f_{12} = k_{12} N^{-1/2}$.

Нужно иметь в виду, что данные моды проявляются *in vitro*, *in vivo* – только тогда, когда перед началом репликации концы петель фибрилл открепляются от ядерного матрикса.

3) КВЧ. Есть предположение, что некоторые моды крутильных колебаний ДНК соответствуют КВЧ. В этом диапазоне лежит частота крутильных колебаний ДНК вируса оспы – 44,4 ГГц, наиболее крупной из вирусных ДНК. Отметим также, что плазмиды человека содержат 300 тыс. пар нуклеотидов, т.е. длина волны крутильных колебаний (см. ниже) – 7,55 мм, частота – 39,7 ГГц, т.е. частота лежит в КВЧ-области.

4) Терагерцовый диапазон. Оценивая изложенные выше данные – сомнительно, чтобы собственные терагерцовые колебания ДНК сельди (не уточнено, какие колебания) точно соотносились с колебаниями бактериальной ДНК. Терагерцовые колебания бактериальной ДНК могут быть связаны с такой степенью свободы, как вращение кольцевой ДНК бактерии как целого (возвращающая сила – из-за прикрепления кольца к клеточной мембране). Частота

$$f = 2\sqrt{G/M/R}, \quad (2)$$

где G – коэффициент жесткости крепления кольца ДНК к мембране, R – радиус кольца, M – масса кольца. Кроме того, спектры содержащихся в клетке катиона NH_4^+ или анионов H_2PO_4

$^-, HPO_4^{2-}, HCO_3^-, NO_3^{2-}, SO_4^{2-}$ – тоже в терагерцовой (и ИК) области [3,24,46]. Вполне возможно, что авторы [33] обнаружили именно эти спектры. Кроме того, длины молекул ДНК сельди близки к длинам ДНК человека. Таким образом, во всяком случае, собственные крутильные колебания отменяются, т.к. собственные частоты крутильных колебаний ДНК человека лежат ниже 5 ГГц.

Отметим, что митохондриальные ДНК человека содержат 16 565 пар нуклеотидов, частоты их крутильных колебаний – в той же области, 0,17 ТГц, длина волны – 1,8 мм.

Частота вРНК вируса гриппа – в том же диапазоне, 0,26-0,24 ТГц, для РНК ВИЧ-1 – 0,37 ТГц, там же лежат собственные частоты крутильных колебаний молекул ДНК некоторых других вирусов.

5) ИК. Естественно, что ИК-спектры ДНК связаны с междоатомными колебаниями, т.к. изгибовые колебания молекул ДНК затруднены в виду компактизации, а вращательные (вокруг центра спирали) в виду большой длины ДНК – невозможны.

6) УФ. Обнаружено, что выживаемость *E. coli* резко возрастает под действием дневного света [15, 19]. Ранее считалось, что спектр поглощения УФ молекулами ДНК – ниже 315 нм (лазерное излучение с длиной волны 532 нм возбуждает электронную систему ДНК, т.к. складываются энергии двух фотонов).

Однако возможно, в данном случае всё же имело место своего рода резонансное действие ультрафиолета частоты, лежащей на границе УФ-А и УФ-В, на систему π -уровней ДНК.

УФ-А – это диапазон энергий 3,10-3,94 эВ, 400-315 нм. УФ-В – 3,94-4,43 эВ, 315-280 нм. УФ-С – 4,43-12,4 эВ, 280-100 нм. УФ-С, с большей энергией, который разрушает ДНК, поглощается озоновым слоем. УФ-А не задерживается озоновым слоем, проходит сквозь стекло.

Система энергетических уровней ДНК образуется вкладом отдельных оснований, каждый уровень размывается, образуя зону. Переходы происходят, в основном, между зонами оснований одного типа. Относительное смещение уровней оснований пренебрежительно мало. Если рассматривать ДНК как квазипериодический полупроводниковый кристалл, примерная ширина запрещенной зоны оснований ДНК составляет по расчетным данным приблизительно 3,83 эВ, по экспериментальным данным – 4 эВ. Т.е., резонансный пограничный УФ-АВ

не разрушает ДНК, не ионизирует, но возбуждает молекулу, облегчает переход в зону проводимости, что усиливает саморепарацию ДНК и метаболизм клетки. Данная частота, 310 нм, не отмечена в спектрах ДНК как резонанс [15].

В [19] указывается, что в данном случае за повышение выживаемости ответственна возникающая в ходе эволюции фотореактивация – репарация ДНК, вызванная дневным светом. Спектр реактивации бактерий – 300-500 нм с максимумом 380 нм. Однако сам механизм репарации, скорее всего, связан именно с переходами через запрещенную зону в полупроводниковой модели ДНК, [9, 10].

7) Из табл. 1 видим: чем меньше мономеров в олигомере, тем больше поглощение в УФ-спектре. Поскольку квантовые переходы в ДНК, обусловленные УФ, «окупированы», остаются колебательно-вращательные моды. Возникает вопрос: каким степеням свободы соответствует линия поглощения олигомеров на 260 нм? Для всех комплексов нуклеосом есть три степени свободы – различные продольные колебания, поперечные колебания, а также колебания, связанные с крутильными колебаниями ДНК.

Очевидно, что, хотя в формуле фигурирует число пар оснований, фактически – за счет коэффициента – в формуле в метафазе присутствует эффективная длина, с учетом сокращения длины спирали ДНК и с учетом увеличения момента инерции за счет нуклеосом. В случае крутильной степени свободы собственная частота крутильных колебаний олигомеров должна снижаться при увеличении числа мономеров пропорционально $N_m^{-1/2}$ (N_m – число мономеров в олигомере). Казалось бы, чем больше мономеров в олигомере – тем больше момент инерции, тем меньше собственная частота крутильных колебаний олигомера, тем дальше от максимального поглощения на 260 нм.

Поскольку крутильные колебания ДНК – классический эффект, зависимость можно определить, прибегая к классической модели крутильных колебаний спирали ДНК.

Ошибочными представляются модели, связанные с выбором участка ДНК, в т.ч. квазикристаллические, без рассмотрения ДНК как целого, соответственно, с получением не двух частот (вращения как ДНК целого и единственной собственной частоты крутильных колебаний), а спектра с нелинейным дисперсионным соотношением. Абсолютные данные таблицы идеально укладываются на параболу

$y_0 = 0,15x_0^2 - 1,45x_0 + 4,3$ с минимумом в 4,8(3), равно примерно 0,8. Кривая в виду приближенности данных легко приводится к виду $y = (5 - x)^2$, т.е. минимум – на пентамере. Понятно, однако, что какие-то физические причины для такого минимума отсутствуют.

Очевидно, что разница между амплитудами ΔA должна быть каким-то образом пропорциональна удалению длины волны $\Delta \lambda$ от той, при которой поглощение максимально.

Если построить зависимость модулей разностей длин волн, что более адекватно $\Delta x_1 = 1, \Delta y_1 = 1, \Delta x_2 = 2, \Delta y_2 = 1,7, \Delta x_3 = 3, \Delta y_3 = 2,1$, то $y = 1,214x^{1/2}$, или $\Delta A = 1,214(N_m)^{1/2}$ (3)

или, выразив через собственные частоты крутильных колебаний участков спирали ДНК с олигомерами:

$$\Delta A \sim (1/f_0^2 - 1/f_1^2)^{1/2} \quad (4)$$

где N_m – число мономеров в комплексе нуклеосом, f_0 – резонансная частота.

При этом, что очевидно, сама амплитуда уменьшается при увеличении частоты поглощения по ниспадающей ветви параболы. Хотя собственная частота крутильных колебаний олигомера при этом падает. Это означает, что такая степень свободы, как крутильные колебания, не может быть ответственной за поглощение олигомерами ультрафиолета.

Однако есть еще одна степень свободы. Продольные колебания нуклеосом вдоль первичной спирали ДНК можно представить как движение связанных пружинных маятников.

При продольных колебаниях (например, антисимметричных колебаниях относительно центра в тримере) частота прямо пропорциональна корню из числа мономеров, поскольку [10] в формулу входит приведенная масса, обратная величина которой пропорциональна сумме обратных величин масс мономеров, которые равны между собой:

$$f = (N_m / M)^{1/2} \quad (5)$$

где M – масса мономера. При увеличении числа мономеров частота возрастает по корневому закону, соответственно, длина волны уменьшается, что соответствует данным таблицы. Хотя в дисперсионном соотношении в модели связанных маятников [18] заметно отклонение от связи $f \sim 1/\lambda$. В приближении связанных маятников дисперсионное соотношение для ДНК как целого выглядит следующим образом:

$$f = 2\sqrt{G / M} \sin \pi d / \lambda \quad (6)$$

где G – коэффициент жесткости «пружины», M – масса мономера, d – расстояние между мономерами в состоянии покоя.

Заметим, что, в отличие от СВЧ, в формуле отсутствует длина «пружины» ДНК.

Предположительно, колебания самих олигосом при достаточной большой их массе могут достигать ИК-спектра. Выпишем систему уравнений движения хотя бы для трех разных по числу мономеров олигосом с одним свободным и другим закрепленным концом, что вполне может моделировать систему олигосом:

$$a_{ij}x^j = 0 \quad (7)$$

где отклонения от равновесия $x_j = (x_1, x_2, x_3)$. При малых колебаниях условие существования решения $\det a_{ij} = 0$ выделяет класс решений, когда в том случае, если массы различны, при числе олигосом больше двух система олигосом перестает совершать связанные колебания, они колеблются сами по себе, с разными амплитудами, а их частоты определяется по формуле

$$f = (2G / N_m M)^{1/2} \quad (8)$$

В общем случае

$$a_{ij} = \begin{pmatrix} -G + \omega_1^2 N_1 M & G & G \\ -G & -G + \omega_2^2 N_2 M & G \\ -G & -G & G - \omega_3^2 N_3 M \end{pmatrix} \quad (9)$$

Из равенства нулю детерминанта матрицы и тождества $m_i = N_i M$ получаем:

$$m_1 m_2 m_3 (\omega_1 \omega_2 \omega_3)^2 - G m_1 m_2 (\omega_1 \omega_2)^2 - G m_1 m_3 (\omega_1 \omega_3)^2 - G m_2 m_3 (\omega_2 \omega_3)^2 = 0$$

Поделив уравнение на произведение масс, видим, что существует единственная общая частота $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$ одновременных колебаний всех олигосом с разной массой:

$$\omega = (G / NM)^{1/2} \quad (10)$$

где N – среднее гармоническое, $N = (\sum_{i=1}^n 1/N_i)^{-1}$, т.е. роль массы в формуле для пружинного маятника играет среднее гармоническое масс всех олигосом. Поскольку G неизвестна, остается невыясненным, в каком диапазоне лежит данная частота.

Обсуждение. Возникает вопрос: может ли поле такой высокой энергии, как УФ, соответствовать продольным колебаниям мономеров, ведь в УФ-диапазоне лежат потенциалы ионизации атомов. Однако.

1) Сама зависимость поглощения от числа мономеров в олигомере говорит о том, что атомные спектры не могут быть ответственными за поглощение. 2) В УФ-спектре незамещенного бензола – наибольшие поглощения на

255 нм, 203 нм, максимум – 183 нм. Спектр имеет тонкую структуру. Расстояния между максимумами – 5-6 нм, что соответствует колебаниям бензольного ядра, т.е. 6-ти атомов углерода. Т.е. колебания бензольного ядра смещают максимумы УФ-спектра. Характерное поглощение самого бензольного кольца – 270 нм. (кольца, а не атома углерода!). 3) УФ-излучение вызывает переходы валентных электронов не только отдельных атомов, но и электронов на валентных молекулярных уровнях. По возбужденным состояниям молекул как целого, а не отдельных атомов, напр., бензальдегида, хлористого бензоила и пр., отвечающим УФ – обширная литература. 4) Вращение фрагментов молекулы относительно друг друга изучают методами в т.ч. УФ-спектроскопии. То есть. УФ вполне может соответствовать вращательной степени свободы. Например, внутренние крутильные частоты бензоилхлорида, бензилфторида – в УФ-диапазоне.

Очевидно, что растяжение и сжатие компактизованной спирали ДНК требует достаточно высоких энергий. Единственно, что корневая зависимость от числа мономеров хотя и получена на 260 нм, но это вовсе не означает, что максимальная амплитуда – именно на 260 нм. Максимум амплитуды вполне может быть и на длине волны и примерно вдвое большей, за пределами УФ. Не исключено также, что полученные формулы (5) и (10) соответствуют колебаниям мономеров в субтерагерцовом спектре, как и полагают авторы в [33], только вместо гистонов в ДНК сельди – протамины.

Очевидно также, что полученные для мод СВЧ формулы – приближенные, для удобства расчетов. Точные формулы, например, для модели криволинейного стержня [4].

Заключение. Таким образом, можно утверждать, что поглощение в УФ-спектре на длине волны 260 нм и вообще в области 200-315 нм обусловлено не только квантовыми переходами в ДНК, но и продольными колебаниями мономеров в олигомерах в спирали ДНК. Хотя поле с длиной волны 260 нм может и не быть резонансным. Во-вторых, при репликации ДНК возникает дополнительный резонанс крутильных колебаний. В-третьих, возможны крутильные колебания колец фибрилл в точках их прикрепления к матриксу. Кроме того, за счет взаимодействия с ядерным матриксом могут возникать дополнительные резонансы.

нансные частоты.

Недостаточность общепринятых моделей ДНК, кроме того, неопределенность в интерпретации спектров ДНК означает необходимость комплексного подхода и объединения баз данных. С другой стороны, уже на уровне петель фибрилл, их закрепление на ядерном матриксе необходимо ведет к изменению собственных частот, которое может быть определено с применением тензорного анализа, в [5, 23], но с привязкой к экспериментальным данным и к практическому применению.

1. Если оправдывается гипотеза, что средний УФ с длиной волны 310 нм стимулирует саморепарацию ДНК, возможно конструирование новых медицинских приборов, генерирующих УФ, которые будут не стерилизовать, а, например, улучшать свойства крови.

2. Нетепловое ЭМП СВЧ может использоваться как при подавлении злокачественных новообразований, так и при лечении инфекционных заболеваний, туберкулеза и др.

3. Возникает экологическая проблема – защиты ДНК человека от электромагнитных колебаний различного диапазона, которые из-

лучают бытовые и промышленные приборы. В том числе – генераторы белого шума, которые покрывают весь спектр частот, негативно действующих на ДНК. Отсюда вытекает необходимость а) коррекции СанПиН, б) паспортизации генома человека, которая потребует использования суперкомпьютеров. Одна из ДНК человека имеет порядка $2,5 \times 10^9$ атомов. При скорости 10^{15} оп/сек для расчета конформных колебаний ДНК потребуется минимум 10^6 сек. Для расчета собственных частот различного типа колебаний ДНК уйдет времени на порядок больше. Что приемлемо, скажем, для самого мощного суперкомпьютера, который сможет посчитать задачу за 3-4 дня. Соответственно для скорости 10^{18} оп/сек. время уменьшится до 3 час.

Необходимо классифицировать комплекс частот приборов, окружающих человека. Вероятно, будут установлены характерные комплексы, в которых, например, проживание человека с данным паспортом может вызвать серьезные отклонения в здоровье данного человека.

Следовательно, остается актуальным дальнейшее исследование спектров ДНК.

SPECTRA OF DNA. REVIEW

B.L. IKHLOV

EDO «Lighthouse», St. Danshina, 19, Perm, 614068, Russia, e-mail: officemayak@mail.ru

Abstract. A brief review of the DNA model, its spectra and levels of compaction of the molecule is given.

It is shown that, in addition to the resonance arising when the DNA is irradiated with a field whose frequency coincides with the natural frequency of the torsional oscillations of the DNA helix, in the presence of replication, an additional resonance arises that is associated with the increasing moment of inertia of the DNA helix.

The data on the resonances of DNA vibrations in the ultraviolet range were analyzed. It is concluded that these resonances are caused not only by quantum transitions, but also associated with longitudinal vibrations of complexes of nucleosomes in complexes. Based on the previous experimental data a model of these oscillations is construct. The formulas for the amplitude and frequency data fluctuations are obtained.

The substantiation of the possibility of the location of the longitudinal vibrations of nucleosomes in the ultraviolet range is given. It is shown that when the number of oligosoms for more than two oligosoms system ceases to perform coherent oscillations, they range themselves, with different amplitudes. Frequencies of their oscillation are received.

It is expected that one may see experience torsional oscillations of loops at the points of attachment to the nuclear matrix and additional frequencies because of the interaction with the nuclear matrix.

Practical conclusions from studies of DNA spectra are given.

Keywords: resonance, treatment, database.

Литература

1. Вологодский А.В., Лукашин А.В., Франк-

References

1. Vologodskij AV, Lukashin AV, Frank-Kameneckij

- Каменецкий М.Д., Аншелевич В.В. Определение амплитуды флуктуаций двойной спирали ДНК // ЖЭТФ. 1974. Т. 66. С. 2153.
2. Бинги В. Принципы электромагнитной биофизики. М.: Физматлит, 2011. С. 345.
3. Большая энциклопедия нефти и газа <http://www.ngpedia.ru/id395145p1.html>
4. Вибрации в технике, Колебания машин, конструкций и их элементов. Справочник. М.: Машиностроение, 1999. Т. 3. С. 42.
5. Голо В.Л., Кац Е.И. Суперспирали в стационарных конфигурациях молекул типа ДНК // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60, Вып. 9. С. 666–671.
6. Девятков Н.Д., Бецкий О.В. Особенности взаимодействия миллиметрового излучения низкой интенсивности с биологическими объектами // В сб.: Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине. М.: ИРЭ АН СССР, 1985. С. 6–20.
7. Девятков Н.Д., Бецкий О.В., Кабисов Р.К. Воздействие низкоэнергетического импульсного СВЧ- и СВЧ-излучений наносекундной длительности с большой пиковой мощностью на биологические структуры (злокачественные образования) // Биомедицинская радиоэлектроника. 1998. № 1. С. 56–62.
8. Жижина Г.П., Олейник Э.Ф. Инфракрасная спектроскопия нуклеиновых кислот // Успехи химии. 1972. Т. 41, №3. С. 474–511.
9. Ихлов Б.Л., Мельниченко А.В., Вольхин И.Л., Новикова В.В., Чиркова Л.А., Ощепков А.Ю. О влиянии электромагнитного поля сверхвысокой частоты на E. coli. // Современные проблемы науки и образования. 2016. №5. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=25259>
10. Ихлов Б.Л., Мельниченко А.В., Ощепков А.Ю. MD, Anshelevich VV. Opredelenie amplitudy fluktuacij dvojnoj spirali DNK [Determination of the amplitude of DNA double helix fluctuations]. ZHEHTF. 1974;66:2153. Russian.
2. Bingi V. Principy ehlektromagnitnoj biofiziki [Principles of electromagnetic Biophysics]. Moscow: Fizmatlit; 2011. Russian.
3. Great encyclopedia of oil and gas <http://www.ngpedia.ru/id395145p1.html>. Russian.
4. Vibracii v tekhnike, Kolebaniya mashin, konstrukcij i ikh ehlementov. Spravochnik [Vibration in technology, Vibrations of machines, structures and their elements. Handbook]. Moscow: Mashinostroenie; 1999. V. 3. Russian.
5. Golo VL, Kac EI. Superspirali v stacionarnykh konfiguracijakh molekul tipa DNK [Superspirals in stationary configurations of DNA-type molecules]. Pis'ma v ZHEHTF. 1994;60(9):666-71. Russian.
6. Devyatkov ND, Beckij OV. Osobennosti vzaimodejstviya millimetrovogo izlucheniya nizkoj intensivnosti s biologicheskimi ob"ektami. V sb.: Primenenie millimetrovogo izlucheniya niz-koj intensivnosti v biologii i medicine [Features of interaction of millimeter radiation of low intensity with biological objects. In sat: application of low intensity millimeter radiation in biology and medicine]. Moscow: IREH AN SSSR; 1985. Russian.
7. Devyatkov ND, Beckij OV, Kabisov RK. Vozdejstvie nizkoehnergeticheskogo impul'snogo KVCH- i SVCH-izluchenij nanosekundnoj dlitel'nosti s bol'shoj pikovoj moshchnost'yu na biologicheskie struktury (zlokachestvennye obrazovaniya) [Effects of low - energy pulsed RF and microwave radiation of nanosecond duration with high peak power on biological structures (malignant tumors)]. Biomedicinskaya radioehlek-tronika. 1998;1:56-62. Russian.
8. Zhizhina GP, Olejnik EHF. Infirakrasnaya spektroskopiya nukleinovyx kislot [Infrared spectroscopy of nucleic acids]. Uspekhi khimii. 1972;41(3):474-511. Russian.
9. Ikhlov BL, Mel'nichenko AV, Vol'khin IL, Novikova VV, Chirkova LA, Oshchepkov AYU. O vliyanii ehlektromagnitnogo polya sverkhvysokoj chastoty na E. coli. [On the influence of the electromagnetic field of ultrahigh frequency on E. coli.]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2016;5. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=25259>. Russian.
10. Ikhlov BL, Mel'nichenko AV, Oshchepkov AYU.

Действие высокочастотного электромагнитного поля на микроорганизмы // Вестник новых медицинских технологий. 2017. Т. 24, №2. С. 141-146. DOI: 10.12737/article_5947d3b2beb626.09180440.

11. Ихлов Б.Л., Евсеев А.В., Мельниченко А.В., Ощепков А.Ю. Метод прерывания митоза опухолевых клеток в конечной стадии интерфазы // Сборник статей VIII международной научно-практической конференции «Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине». 20-22 мая 2015 года. СПб, 2015. С. 48–55.

12. Ихлов Б.Л., Мельниченко А.В., Ощепков А.Ю. Оценка собственных частот крутильных колебаний ДНК человека. Материалы Международной научно-практической конференции «Новая наука: современное состояние и пути развития». Стерлитамак, 2016, Ч. III. С. 3–11.

13. Ихлов Б.Л., Мельниченко А.В., Ощепков А.Ю. Резонансное поглощение сверхвысокочастотного электромагнитного поля молекулами ДНК // Современные проблемы науки и образования. 2016. №6. URL: <http://www.science-education.ru/article/view?id=25910>

14. Кантор Ч., Шиммель П. Биофизическая химия. М.: Мир, 1985. Ч. 3. С. 161.

15. Карнаухова Л.И., Тупицын Е.Н. УФ-спектроскопия биологических макромолекул. Саратов: СГУ, 2002.

16. Ковалева Н.А., Маневич Л.И., Мусиенко А.И., Савин А.В. Низкочастотные локализованные колебания двойной спирали ДНК. М.: РАН. Институт химической физики, 2009.

17. Козьмин Г.В., Егорова В.И. Устойчивость биоценозов в условиях изменяющихся электромагнитных свойств биосферы // Биомед. технологии

Dejstvie vysokochastotnogo ehlektromagnitnogo polya na mikroorganizmy [Effect of high-frequency electromagnetic field on microorganisms]. Vestnik novykh medicin-skikh tekhnologij. 2017;24(2):141-6. DOI: 10.12737/article_5947d3b2beb626. 09180440. Russian.

11. Ikhlov BL, Evseev AV, Mel'nichenko AV, Oshchepkov AYU. Metod preryvaniya mitozu opukholevykh kletok v konechnoj stadii interfa-zy. Sbornik statej VIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Vysokie tekhnologii, fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v fiziologii i medicine». 20-22 maya 2015 goda [Method of interruption of mitosis of tumor cells in the final stage of interphase. Collection of articles of the VIII international scientific and practical conference "High technologies, fundamental and applied research in physiology and medicine". 20-22 may 2015]. SPb; 2015. Russian.

12. Ikhlov BL, Mel'nichenko AV, Oshchepkov AYU. Ocenka sobstvennykh chastot krutil'nykh kolebanij DNK cheloveka. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Novaya nauka: sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya» [Estimation of natural frequencies of torsional vibrations of human DNA. Materials of the International scientific-practical conference "New science: current state and ways of development"]. Sterlitamak; 2016. ch. III. Russian.

13. Ikhlov BL, Mel'nichenko AV, Oshchepkov AYU. Rezonansnoe pogloshchenie sverkhvysokochastotnogo ehlektromagnitnogo polya molekulami DNK [Resonant absorption of an ultra-high-frequency electromagnetic field by DNA molecules]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2016;6. URL: <http://www.science-education.ru/article/view?id=25910>. Russian.

14. Kantor CH, SHimmel P. Biofizicheskaya khimiya [Biophysical chemistry]. Moscow: Mir; 1985. CH. 3. Russian.

15. Karnaukhova LI, Tupicyn EN. UF-spektroskopiya biologicheskikh makromolekul [UV-spectroscopy of biological macromolecules]. Saratov: SGUzh; 2002. Russian.

16. Kovaleva NA, Manevich LI, Musienko AI, Savin AV. Nizkochastotnye lokalizovannye kolebaniya dvojnoj spirali DNK [Low-frequency localized vibrations of the DNA double helix]. Moscow: RAN. Institut khimicheskoy fi-ziki; 2009. Russian.

17. Koz'min GV, Egorova VI. Ustojchivost' biocenozov v usloviyakh izmenyayushchikhsya ehlektromagnitnykh svojstv biosfery [Stability of biocenoses in

- и радиоэлектроника. 2006. №3. С. 61–72.
18. Крауфорд Ф. Волны. М.: «Наука», 1974. С. 90.
19. Круковская Л.П. Ультрафиолетовое излучение: его биологическая активность. Приемники. URL: <http://window.edu.ru/resource/557/29557/files/spbstu041.pdf>
20. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Краткий курс теоретической физики. М.: «Наука», 1988, Т. I. С. 101.
21. Льюин Б. Гены. М.: Мир, 1987.
22. Мкртчян Л.Н., Ситько С.П., Шукарян С.Г. О влиянии миллиметрового электромагнитного излучения на опухолевый рост в эксперименте // В сб.: Фундаментальные и прикладные аспекты применения миллиметрового электромагнитного излучения в медицине. I Всесоюзный симпозиум с международным участием. Киев. 10-13 мая 1989 г. Киев, 1989. С. 315–317.
23. Мырзакулов Е.Р., Белисарова Ф.Б., Шайхова Г. Уравнение деформации молекулы ДНК // Вестник национальной академии наук Республики Казахстан. 2008. №5. С. 78–80.
24. Пентин Ю.А., Вилков Л.В. Физические методы исследования в химии. М.: Мир, 2003.
25. Плетнев С.Д., Девятков Н.Д., Голант М.Б. КВЧ излучение в клинической практике. В сб.: Миллиметровые волны нетепловой интенсивности в медицине. Международный симпозиум. Москва, 3-6 октября 1991 г. Москва, 1991. С. 32–42.
26. Пресман А.С. Электромагнитные поля и живая природа. М.: «Наука», 1968. 288 с.
27. Руденко Е.Д., Сабанцев А.В., Швецов А.В., Илатовский А.В., Червякова Д.Б., Григорьев М.Ю., Печенкин А.В. [The effect of millimeter electromagnetic radiation on the conditions of changing electromagnetic properties of the biosphere]. Biomed. tekhnologii i radioelektronika. 2006;3:61-72. Russian.
18. Krauford F. Volny [Waves]. Moscow: «Nauka»; 1974. Russian.
19. Krukovskaya LP. Ul'trafiioletovoe izluchenie: ego biologicheskaya aktivnost'. Priemniki [Ultraviolet radiation: its biological activity. Receivers]. URL: <http://window.edu.ru/resource/557/29557/files/spbstu041.pdf> Russian.
20. Landau LD, Livshic EM. Kratkij kurs teoreticheskoj fiziki [A brief course in theoretical physics]. Moscow: «Nauka»; 1988. T. I. Russian.
21. L'yuin B. Geny [Genes]. Moscow: Mir; 1987. Russian.
22. Mkrтчyаn LN, Sit'ko SP, Shukaryan SG. O vliyаnii millimetrovogo ehlektromagnitnogo izlucheniya na opukholevyj rost v ehksperimente. V sb.: Fundamental'nye i prikladnye aspekty primeneniya millimetrovogo ehlektro-magnitnogo iz-lucheniya v medicine. I Vsesoyuznyj simpozium s mezhdunarodnym uchastiem. Kiev. 10-13 maya 1989 g. [On the effect of millimeter electromagnetic radiation on tumor growth in the experiment. In: Fundamental and applied aspects of the use of millimeter electromagnetic radiation in medicine. I all-Union Symposium with international participation. Kiev. May 10-13, 1989]. Kiev; 1989. Russian.
23. Myrzakulov ER, Belisarova FB, SHajkhova G. Uravnenie deformacii molekuly DNK [The equation of deformation of the DNA molecule]. Vestnik nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazakhstan. 2008;5:78-80. Russian.
24. Pentin YUA, Vilkov LV. Fizicheskie metody issledovaniya v khimii [Physical research methods in chemistry]. Moscow: Mir; 2003. Russian.
25. Pletnev SD, Devyatkov ND, Golant MB. KVCH izluchenie v klinicheskoj praktike. V sb.: Millimetrovye volny neteplovoj intensivnosti v medicine. Mezhdunarodnyj simpozium. Moskva, 3-6 oktyabrya 1991 g. [HF radiation in clinical practice. In sat.: Millimeter waves of non-thermal intensity in medicine. International symposium. Moscow, 3-6 October 1991]. Moscow; 1991. Russian.
26. Presman AS. EHlektromagnitnye polya i zhivaya priroda [Electromagnetic fields and wildlife]. Moscow: «Nauka»; 1968. Russian.
27. Rudenko ED, Sabancev AV, SHvecov AV, Ilatovskij AV, CHervyakova DB, Grigor'ev MYU,

тухов М.Г. Анализ молекулярных механизмов растяжений коротких фрагментов двухнитевых ДНК // Научно-технические ведомости СПб политехнического университета. Физико-математические науки. 2011. №4 (134). С. 147–153.

28. Севастьянова Л.А., Потапов С.Л., Адаменко В.Г. Комбинированное воздействие рентгеновского и сверхвысокочастотного излучения на костный мозг // Научные доклады высшей школы, сер. Биологические науки. 1969. Т. 66 (6). С. 46–48.

29. Севастьянова Л.А., Голант М.Б., Зубенкова Э.С. Действие радиоволн миллиметрового диапазона на нормальные ткани и злокачественные новообразования // В сб.: Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине. М.: ИРЭ АН СССР, 1985. С. 37–49.

30. Севастьянова Л.А. Особенности биологического воздействия радиоволн мм диапазона и возможности их использования в медицине // Вестник АМН СССР. 1979. № 2. С. 65–68.

31. Ситько С.П., Мкртчян Л.Н. Введение в квантовую медицину. Киев: «Паттерн», 1994. 147 с.

32. Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. М.: МГУ, 2012. С. 1–54.

33. Цуркан М.В., Собакинская Е.А., Смолянская О.А. Исследование спектра молекулы ДНК в терагерцовой области частот // Научно-технический вестник СПбГУ информационных технологий, механики и оптики. 2012. №1(77). С. 15–18.

34. Цуркан М.В., Собакинская Е.А., Смолянская О.А., Беспалов В.Г., Вакс В.Л., Балбекин Н.С. Исследование спектра молекулы ДНК в терагерцовой области частот // Научно-технический вестник СПбГУ информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1(77). С. 15–19.

35. Alijabbari N., Chen Y., Sizov I., Globus T., Gelmont B. Molecular dynamics modeling of the sub-

Petukhov MG. Analiz molekulyarnykh mekhanizmov rastyazhenij korotkikh fragmentov dvukhnitevykh DNK [Analysis of the molecular mechanisms of stretching of short fragments of DNA]. Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPb politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki. 2011;4 (134):147-53. Russian.

28. Sevast'yanova LA, Potapov SL, Adamenko VG. Kombinirovannoe vozdejstvie rentgenovskogo i sverkhvysokochastotnogo izlucheniya na kostnyj mozg [Combined effect of x-ray and microwave radiation on bone marrow]. Nauchnye doklady vysshej shkoly, ser. Biologicheskie nauki. 1969;66 (6):46-8. Russian.

29. Sevast'yanova LA, Golant MB, Zubenkova EHS. Dejstvie radiovoln millimetrovogo diapazona na normal'nye tkani i zlokachestvennye novoobrazovaniya. V sb.: Primenenie millimetrovogo izlucheniya nizkoj intensivnosti v biologii i medicine [Action of millimeter-wave radio waves on normal tissues and malignant neoplasms. In sat: application of low intensity millimeter radiation in biology and medicine]. Moscow: IREH AN SSSR; 1985. Russian.

30. Sevast'yanova LA. Osobennosti biologicheskogo vozdejstviya radiovoln mm diapazona i vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya v medicine [Features of the biological effects of radon mm Range and the possibility of their use in medicine]. Vestnik AMN SSSR. 1979;2:65-8. Russian.

31. Sit'ko SP, Mkrтчyan LN. Vvedenie v kvantovuyu medicinu [Introduction to quantum medicine]. Kiev: «Pattern»; 1994. Russian.

32. Tarasevich BN. IK-spektry osnovnykh klassov organicheskikh soedinenij [IR spectra of the main classes of organic compounds]. Moscow: MGU; 2012. Russian.

33. Curkan MV, Sobakinskaya EA, Smolyanskaya OA. Issledovanie spektra molekuly DNK v teragercovoj oblasti chastot [Study of the DNA molecule spectrum in the terahertz frequency region]. Nauchno-tehnicheskij vestnik SPbGU informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2012;1(77):15-8. Russian.

34. Curkan MV, Sobakinskaya EA, Smolyanskaya OA, Bespalov VG, Vaks VL, Balbekin NS. Issledovanie spektra molekuly DNK v teragercovoj oblasti chastot [Study of the DNA molecule spectrum in the terahertz frequency region]. Nauchno-tehnicheskij vestnik SPbGU informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2012;1(77):15-9. Russian.

35. Alijabbari N, Chen Y, Sizov I, Globus T, Gelmont B. Molecular dynamics modeling of the sub-THz vi-

THz vibrational absorption of thioredoxin from *E. coli* // *J Mol Model*. 2012. Vol. 18, Iss. 5. P. 2209–2218. DOI: 10.1007/s00894-011-1238-6.

36. 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.

37. Globus T., Gelmont B. Biological Detection with Terahertz Spectroscopy // In *Bioaerosol Detection Technologies, Integrated Analytical Systems*. 2014. Chapter 11. Edited by P. Jonsson. DOI: 10.1007/978-1-4419-5582-1_11.

38. Globus T., Gelmont T., Sizov I. Overview of THz spectral characterization for biological identification // In: *Biological Identification, 1st Edition. DNA Amplification and Sequencing, Optical Sensing, Lab-On-Chip and Portable Systems*. Ed: Schaudies P. Woodhead Publishing, 2014. 470 p.

39. Globus T., Khromova T., Gelmont B., Voolard D., Tamm L.K. Terahertz characterization of dilute solution of DNA // *Proc. Of SPIE*. 2006. Vol. 6093. P. 609308.1-608309.12.

40. Globus T., Moyer A., Gelmont B., Khromova T., Sizov I., Ferrance J. Sub-terahertz resonance spectroscopy of biological macromolecules and cells // *Terahertz Physics, Devices, and Systems VII: Advanced Applications in Industry and Defense*. 2013. 87160N doi:10.1117/12.2016108

41. Globus T., Norton M.L., Lvovska M.I., Gregg D.A., Khromova T.B., Gelmont D.L. Reliability Analysis of THz Characterization of Modified and Unmodified Vector Sequences // *IEEE Sensors Journal*. 2010. Vol.10, №3. P. 410–418.

42. Globus T., Sizov I., Gelmont B. Sub-THz specific relaxation times of hydrogen bond oscillations in *E.coli* thioredoxin // *Molecular dynamics and statistical analysis. Faraday Discuss.* 2014. Vol. 171. P. 179–193. DOI: 10.1039/c4fd00029c

43. Globus T., Sizov I., Gelmont B. Terahertz vibrational spectroscopy of *E. coli* and molecular constituents // *Computational modeling and experiment, Advances in Bioscience and Biotechnology*. 2013. №4. P. 493–503. DOI: 10.4236/abb.2013.43A065

44. Michaelson S. The Influence of Microwaves on Ionizing Radiation Exposure // *Aerospace Medicine*. 1963. Vol. 34. P. 111.

45. Powell J.V. *Phys. Rev.* 1987. V. A-35. P. 3929.

46. Ruggiero M.T., Sibik J., Orlando R., Zeitler J.A.,

brational absorption of thioredoxin from *E. coli*. *J Mol Model*. 2012;18(5):2209-18. DOI: 10.1007/s00894-011-1238-6.

36. Fisher VM. Far-infrared vibrational modes of DNA components studied by terahertz time domain spectroscopy. *Phys. Med. Biol.* 2002;47:3807-14.

37. Globus T, Gelmont B. Biological Detection with Terahertz Spectroscopy. In *Bioaerosol Detection Technologies, Integrated Analytical Systems*. 2014. Chapter 11. Edited by P. Jonsson. DOI: 10.1007/978-1-4419-5582-1_11.

38. Globus T, Gelmont T, Sizov I. Overview of THz spectral characterization for biological identification. In: *Biological Identification, 1st Edition. DNA Amplification and Sequencing, Optical Sensing, Lab-On-Chip and Portable Systems*. Ed: Schaudies P. Woodhead Publishing; 2014.

39. Globus T, Khromova T, Gelmont B, Voolard D, Tamm LK. Terahertz characterization of dilute solution of DNA. *Proc. Of SPIE*. 2006;6093:609308.1-608309.12.

40. Globus T, Moyer A, Gelmont B, Khromova T, Sizov I, Ferrance J. Sub-terahertz resonance spectroscopy of biological macromolecules and cells. *Terahertz Physics, Devices, and Systems VII: Advanced Applications in Industry and Defense*. 2013. 87160N doi:10.1117/12.2016108

41. Globus T, Norton ML, Lvovska MI, Gregg DA, Khromova TB, Gelmont DL. Reliability Analysis of THz Characterization of Modified and Unmodified Vector Sequences. *IEEE Sensors Journal*. 2010;10(3):410-8.

42. Globus T, Sizov I, Gelmont B. Sub-THz specific relaxation times of hydrogen bond oscillations in *E.coli* thioredoxin. *Molecular dynamics and statistical analysis. Faraday Discuss.* 2014;171:179-93. DOI: 10.1039/c4fd00029c

43. Globus T, Sizov I, Gelmont B. Terahertz vibrational spectroscopy of *E. coli* and molecular constituents. *Computational modeling and experiment, Advances in Bioscience and Biotechnology*. 2013;4:493-503. DOI: 10.4236/abb.2013.43A065

44. Michaelson S. The Influence of Microwaves on Ionizing Radiation Exposure. *Aerospace Medicine*. 1963;34:111.

45. Powell JV. *Phys. Rev.* 1987;A-35:3929.

46. Ruggiero MT, Sibik J, Orlando R, Zeitler JA, Kor-

Korter T.M. Measuring the Elasticity of Poly-l-Proline Helices with Terahertz Spectroscopy // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016. №55. P. 6877–6881.

47. Semenov M., Bolbukh T., Maleev V. Infrared study of influence of water on DNA stability in dependence of AT/GC composition // *Journal of Mol. Structure.* 1997. V. 408/409. P. 213–217.

48. Sitko S.P., Mkrtchian L.N. Millimeter Electromagnetic Radiation in Experimental and Clinical Oncology // Publishing House, Oncology Research Center of Ministry of Public Health of Republic of Armenia and Scientific Research Center in Kiev, 1991. 31 p.

49. Sitko S.P., Mkrtchian L.N., Derendiaev S. Physics of Alive in Medico-Biological aspects. // *Physics of RI.* 1993. № 1 (1). P. 110–131.

50. Sizov I., Rahman M., Gelmont B., Norton M.L., Globus T. Sub-THz spectroscopic characterization of vibrational modes in artificially designed DNA monocrystal // *Chem. Phys.* 2013. Vol. 425. P. 121–125.

51. Vaks V.L., Semenova A.V., Khodzitsky M.K., Odlyanitskiy E.L., Sedykh E.A., Balya V.K., Smolyanskaya O.A. Gyrotropy and absorption of DNA and amylose at THz frequencies // *International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz*, 2016. P. 7758458.

ter T.M. Measuring the Elasticity of Poly-l-Proline Helices with Terahertz Spectroscopy. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016;55:6877-81.

47. Semenov M, Bolbukh T, Maleev V. Infrared study of influence of water on DNA stability in dependence of AT/GC composition. *Journal of Mol. Structure.* 1997;408/409:213-7.

48. Sitko SP, Mkrtchian LN. Millimeter Electromagnetic Radiation in Experimental and Clinical Oncology. Publishing House, Oncology Research Center of Ministry of Public Health of Republic of Armenia and Scientific Research Center in Kiev; 1991.

49. Sitko SP, Mkrtchyan LN, Derendyaev S. Physics of living in medical and biological aspects. *Physics of RI.* 1993;1(1):110-31.

50. Sizov I, Rahman M, Gelmont B, Norton ML, Globus T. Sub-THz spectroscopic characterization of vibrational modes in artificially designed DNA monocrystal. *Chem. Phys.* 2013;425:121-5.

51. Vaks VL, Semenova AV, Khodzitsky MK, Odlyanitskiy EL, Sedykh EA, Balya VK, Smolyanskaya OA. Gyrotropy and absorption of DNA and amylose at THz frequencies. *International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz*; 2016.