

УДК 576.8:612.014.426

## ЗАВИСИМОСТЬ ДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛН НА КЛЕТКИ *E. coli* ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА И ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2006 г. В. Л. Ушаков\*<sup>1</sup>, Е. Д. Алипов<sup>1</sup>, В. С. Щеглов<sup>1</sup>, И. Я. Беляев<sup>2,3</sup><sup>1</sup>Московский инженерно-физический институт (государственный университет), Москва, Россия<sup>2</sup>Институт общей физики РАН, Москва, Россия<sup>3</sup>Стокгольмский университет, Стокгольм, Швеция

С помощью метода аномальной временной зависимости вязкости (АВЗВ) была исследована зависимость действия низкоинтенсивных микроволн,  $10^{-4}$  и  $10^{-10}$  Вт/см<sup>2</sup>, на конформацию нуклеоидов в клетках *E. coli* от концентрации кислорода ( $C = 2.3\text{--}7.8$  мг/л) в облучаемой клеточной суспензии и величины постоянного магнитного поля (ПМП) в момент облучения (8–90 мкТл). Показано, что незначительные по величине изменения в концентрации кислорода и ПМП приводят к существенному изменению величины эффекта микроволн вплоть до его исчезновения. Установлено, что изменения величины ПМП в момент облучения влияют на кинетику развития эффекта действия ММВ. Полученные данные указывают на сильную зависимость эффектов ММВ от физических параметров облучения и физиологических факторов. Эта зависимость должна учитываться для воспроизведения результатов. Полученные в настоящей работе данные обосновывают дальнейшее исследование модуляции резонансных эффектов микроволн с помощью дополнительного воздействия электромагнитным полем.

*Миллиметровые волны, постоянное магнитное поле.*

В работе [1] был определен спектр действия низкоинтенсивных ММВ на клетки *E. coli* в области 51–52 ГГц при плотности потока энергии (ППЭ) 100 мкВт/см<sup>2</sup>. Было показано, что эффективные частоты спектра действия ММВ отличались по знаку эффективной циркулярной поляризации, а наблюдаемые при используемых ППЭ биологические эффекты действия ММВ не связаны с нагреванием клеточной суспензии. От начала культивирования и до лизиса клетки находились в геомагнитном поле с индукцией  $B = 49 \pm 5$  мкТл. Зависимость резонансных эффектов ММВ от постоянного магнитного поля других ЭМП была ранее предсказана при рассмотрении этих эффектов в рамках модели электронно-конформационных взаимодействий [2]. В работе [3] было показано, что знак эффекта и эффективная частота действия ММВ на клетки нейтрофилов зависят от величины постоянного магнитного поля (ПМП) в момент облучения и последующего инкубационного периода: при ПМП с величиной  $B = 50$  мкТл эффективная частота действия ММВ (в области частот 41.80–42.15 ГГц) была 41.95 ГГц, а при ПМП  $B = 95$  мкТл она составляла 42.00 ГГц. В данной работе проанализировано влияние

величины ПМП в момент облучения клеток *E. coli* на изменение полученного в [1] спектра действия ММВ.

На эффект действия ММВ могут оказывать влияние физиологические параметры, которые включают все условия роста клеточной культуры (например, состав среды роста) и облучения [4–9]. В исследованиях [5] была проанализирована зависимость эффектов ММВ от фазы роста клеточной популяции. В настоящей работе исследована зависимость эффекта ММВ от степени аэрации клеточной суспензии.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

**Клетки.** В работе использовался штамм *E. coli* K12: *AB1157 F<sup>-</sup> thr-1 ara-14 leu-B6 proA2 lacGI tsx-33 supE44 galK2 hisG4 rfbDI mgl-51 rpsL31 xyl-5 mtl-1 argE3 thi-1 λ<sup>-</sup>rac<sup>-</sup>*. Штамм *E. coli* K12 AB1157 получен от Айзенберг О.А. (Институт биофизики РАМН, Москва, Россия). Получение культуры клеток *E. coli* со стационарной фазы роста, перенесение их в буфер М9 и лизис проводились по методике, описанной в работе [1].

**Облучение клеток.** Приготовленную в буфере М9 клеточную суспензию ( $ОД_{550} = 0.12$ , что соответствовало в среднем  $4 \times 10^7$  кл/мл) разливали по 3.5 (4.5) мл в отдельные чашки Петри с диамет-

<sup>1</sup> Адресат для корреспонденции: 115409, Москва, Каширское ш., 31, МИФИ, каф. 1; тел. (495) 323-92-24; факс: (495) 324-21-11; e-mail: VLushakov@mephi.ru.

ром 50 мм. Для облучения ММВ использовалась стандартная установка, описанная в работе [1]. Облучение суспензии клеток (толщина поглощающего слоя 1.7 мм) производилось 10 мин, в чашках Петри диаметром 50 мм<sup>2</sup> при помощи пирамидального рупора, имеющего размеры 40 × 50 мм<sup>2</sup>. Образцы защищали от отраженных миллиметровых волн углеродсодержащим и алюминиевым экранами. В ложном облучении (sham-контроль) суспензия клеток облучалась 10 мин при нормальном режиме работы генератора на частоте 51.755 ГГц со всеми закрытыми аттенуаторами, что согласно калибровке аттенуаторов должно соответствовать ППЭ = 10<sup>-21</sup> Вт/см<sup>2</sup>.

В каждом эксперименте в качестве позитивного контроля проводилось облучение клеток на ранее обнаруженной частоте 51.755 ГГц, ППЭ = 10<sup>-4</sup> Вт/см<sup>2</sup>, время облучения 10 мин [10, 11].

Время между облучением и лизисом было 120 мин. Контрольные клетки, а также экспериментальные клетки до облучения и между облучением (ложным облучением) и лизисом, были защищены от воздействия ММВ алюминиевым экраном. После облучения и соответствующей инкубации суспензия клеток из каждой чашки Петри контрольной и экспериментальной группы была разделена на 3 или 4 части (по 1 мл) и помещена в пробирки для лизиса клеток.

От начала культивирования и до лизиса все клетки (контрольные, подвергнутые ложному облучению и облученные) находились в геомагнитном поле с индукцией  $B_0 = 49 \pm 5$  мкТл (вертикальная составляющая геомагнитного поля  $B_z = 44$  мкТл, горизонтальная составляющая, параллельная короткой стороне рупора,  $B_x = 21$  мкТл, горизонтальная составляющая, параллельная длинной стороне рупора  $B_y = 8$  мкТл). Переменное низкочастотное поле не превышало 50 нТ.

В основной волне  $H_{01}$ , распространяющейся в прямоугольном волноводе излучательного тракта, плоскость колебаний вектора напряженности электрического поля  $E$  параллельна высоте прямоугольного волновода (направление вдоль короткой стороны рупора). Магнитное поле волны  $H_{01}$  имеет составляющую в направлении своего распространения и составляющую вдоль ширины прямоугольного волновода (направление вдоль длинной стороны рупора).

При исследовании сочетанного действия ММВ и постоянных ПМП. Постоянные магнитные поля в районе облучения клеток создавались с помощью катушек Гельмгольца. Вертикальная составляющая геомагнитного поля  $B_z$  полностью компенсировалась. Одна из горизонтальных составляющих, параллельная длинной стороне рупора, была постоянной  $B_y = 8$  мкТл, а вторая, параллельная короткой стороне рупора  $B_x$  варьировалась. При сочетанном воздействии ММВ и

ПМП для ложного облучения пробы с клетками помещались на 10 мин в активированные катушки Гельмгольца в ПМП той же величины, что и клетки при сочетанном воздействии, при полностью закрытых трех полосковых аттенуаторах волнового тракта и одного аттенуатора генератора Г4-141.

**Измерение кривых АВЗВ и анализ результатов.** Измерения кривых АВЗВ проводили как описано ранее [1, 5, 6, 10, 11], используя автоматический вискозиметр типа Зимма-Крозерса. Чувствительным параметром служил максимальный период оборота ротора ( $T_{\max}$ ), пропорциональный эффективной максимальной вязкости раствора. Величина эффекта на клетки *E. coli* или их лизаты оценивалась по величине максимальной относительной вязкости, равной отношению усредненного по нескольким пробиркам (не менее трех) максимального периода оборота ротора в экспериментальной точке к среднему периоду оборота ротора в контрольных лизатах (клетки или их лизаты либо не подвергались какому-либо воздействию или подвергались ложному облучению как указано выше). В каждом эксперименте, помимо ложного облучения, использовалось три контроля (каждый контроль представлял 3–4 независимых тест-пробирки с лизатами контрольных клеток), различающихся по времени лизиса: вместе с первой облученной пробой, в середине серии облученных проб, вместе с последней облученной пробой. Это позволило контролировать возможные артефакты, связанные со временем инкубации клеток в М9 или действием каких-либо неконтролируемых в процессе проведения эксперимента факторов. Как правило, на всем протяжении эксперимента величина  $T_{\max}$  пиков АВЗВ в клеточных лизатах контроля и ложного облучения сохраняла неизменную величину, поэтому величины  $T_{\max}$  всех пиков АВЗВ в лизатах контрольных и ложно облученных клеток усреднялись, а эффект действия ММВ оценивался как отношение средней по трем или четырем независимым тест-пробиркам величины максимального пика оборота ротора  $T_{\max}$  в лизатах облученных клеток к усредненному  $T_{\max}$  в контроле и ложном облучении. Для статистической обработки полученных данных использовали t-test Стьюдента.

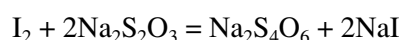
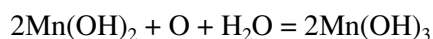
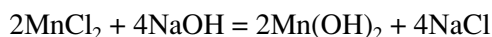
**Определение концентрации растворенного в воде кислорода по методу Винклера.** Для определения концентрации кислорода в клеточной среде использовался метод Винклера [12]. Принцип метода основан на проведении трех последовательных окислительно-восстановительных реакций: связывание кислорода, растворенного в воде (фиксация); освобождение свободного йода в эквивалентном зафиксированному кислороду количестве; титрование свободного йода точным раствором гипосульфита, и по его количеству, пошедшему на титрование, вычисляется количество

**Таблица 1.** Действие ММВ на клетки *E. coli*, находящихся в буфере М9 с разной концентрацией O<sub>2</sub>

Буфер М9	Начальная концентрация кислорода в буфере М9	Концентрация кислорода в буфере М9 перед лизисом	Величина эффекта ММВ	Уровень значимости
Обедненный по O <sub>2</sub>	2.3 ± 0.2	5.4 ± 0.5	1.07 ± 0.06	<i>p</i> > 0.05
Стандартный по O <sub>2</sub>	6.2 ± 0.6	7.4 ± 0.7	1.13 ± 0.04	<i>p</i> = 0.05
Обогащенный по O <sub>2</sub>	7.8 ± 0.8	7.8 ± 0.8	1.05 ± 0.08	<i>p</i> > 0.05

Примечание. Результаты трех независимых экспериментов. Концентрация кислорода в буфере М9 приведена в мг/л.

кислорода. В основе всего процесса определения лежат следующие химические реакции:



В пикнометры (11 мл) осторожно наливают исследуемую воду так, чтобы поступающая вода, поднимаясь, вытесняла верхние слои воды, которые несколько перемешались с воздухом. Верхним слоям дают стечь (примерно 1/3 объема), прибавляют по 0.5 мл реактивов Винклера – сначала вводят раствор NaOH с KI, а затем раствор MnCl<sub>2</sub>, закрывают пикнометр пробкой так, чтобы под нею не оставалось пузырьков воздуха, и перемешивают. Образовавшийся осадок распределяется по всему пикнометру и приобретает окраску в зависимости от концентрации кислорода. Пробу с зафиксированным кислородом ставят в темное место на 1–2 ч. По истечении этого времени в пикнометры прибавляют 0.5 мл концентрированной H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> или H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1 : 1), перемешивают до полного растворения осадка и приступают к титрованию гипосульфитом. Для этого содержимое пикнометра выливают в коническую колбу, титруют гипосульфитом до получения еле заметного желтого цвета, потом прибавляют 0.5 мл 0.2%-ного раствора крахмала и получившийся раствор синеватого цвета вновь титруют до полного обесцвечивания. После этого часть бесцветного раствора переливают обратно в пикнометр, ополаскивают его и снова переливают в колбу. Пробу окончательно дотитровывают прибавлением нескольких капель из бюретки до полного обесцвечивания раствора.

Расчет количества кислорода производился по формуле

$$C = \frac{nF0.08}{V - v} \times 1000 \text{ мг O}_2/\text{л},$$

где *n* – количество гипосульфита, пошедшее на титрование пробы; *F* – поправка на его нормальность (для 0.01 н); *V* – объем пикнометра; *v* – ко-

личество прибавленных реактивов Винклера (мл); *V* – *v* – объем исследуемой воды. 0.08 берут, если нужно вычислить содержание кислорода в миллиграммах, а 0.0558 – если вычисляют в миллилитрах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работах [5, 13, 14] при облучении клеток *E. coli* циркулярно-поляризованными и линейно-поляризованными ММВ (ППЭ = 100 мкВт/см<sup>2</sup>) на резонансных частотах 51.76 ГГц и 41.32 ГГц была показана зависимость знака и величины эффекта действия ММВ на клетки *E. coli* AB1157 от фазы роста клеточной популяции. Для клеток, взятых с логарифмической фазы роста, действие ММВ всех поляризаций проявляется в уменьшении пиков АВЗВ, а для стационарных клеток – в увеличении. Для клеток, взятых с конца логарифмической фазы роста, эффект действия ММВ не наблюдался. Отметим, что во всех этих экспериментах клетки росли без принудительной аэрации. Концентрация кислорода в среде и в клетках могла изменяться в процессе роста клеток.

В данной работе было проведено исследование зависимости величины эффекта действия ММВ от содержания кислорода в буфере М9 при облучении клеток (частота 51.755 ГГц, время облучения 10 мин, ППЭ = 100 мкВт/см<sup>2</sup>). В проведенных экспериментах изменяли концентрацию растворенного кислорода в буфере М9 перед ресуспендированием в нем клеток:

1) уменьшали – откачиванием водяным насосом (1 ч) и последующим 10-минутным продуванием гелием (“ос. ч.”);

2) обогащали – продуванием воздуха (1 ч).

Измерения концентрации O<sub>2</sub> по методу Винклера производили два раза: сразу после помещения клеток в буфер М9 и непосредственно перед лизисом. Все это время клетки находились в плотно закрытых пробирках или чашках Петри. В табл. 1 приведены суммарные данные трех независимых экспериментов по действию ММВ на клетки *E. coli*, находящихся в буфере М9 с разной концентрацией кислорода. Время от суспендирования клеток в среде М9 до облучения было



Кинетики развития эффекта действия на клетки *E. coli* различных электромагнитных полей.

30 мин. Время между облучением и лизисом составляло – 120 мин. Как видно из табл. 1 существует тенденция к нивелированию эффектов действия ММВ в используемых схемах эксперимента при изменении концентрации кислорода, определяющего клеточное дыхание, как в сторону его увеличения, так и уменьшения. В наших условиях наиболее оптимальной являлась концентрация кислорода в среде облучения 6.2–7.4 мг/л. Концентрация кислорода в воде при температуре 20°C – 9.2 мг/л [11]. Отличие концентрации кислорода в буфере М9 (даже при его обогащении кислородом) от табличной для воды объясняется, по-видимому, методической ошибкой, связанной с наличием в буфере М9 реагентов, вносящих погрешность в определение кислорода по методу Винклера, а также тепловой стерилизацией растворов, использованных для приготовления буфера М9, проводимой непосредственно перед началом эксперимента.

Результаты сочетанного действия на клетки *E. coli* ММВ и постоянных магнитных полей сводились к следующему. Частоты ММВ в экспериментах были 51.675 ГГц, 51.755 ГГц, 51.835 ГГц. В течение 10 мин клетки подвергались сочетанному действию ММВ (ППЭ =  $10^{-10}$  Вт/см<sup>2</sup>) и ПМП с различной величиной магнитной индукции  $B$  ( $8 \pm 1$  мкТл,  $22 \pm 2$  мкТл,  $49 \pm 5$  мкТл,  $61 \pm 5$  мкТл,  $90 \pm 5$  мкТл). ПМП соответствующей величины создавалось с помощью катушек Гельмгольца. Для получения вышеуказанных индукций  $B$ , вертикальная составляющая  $B_z$  была скомпенсирована с помощью катушек Гельмгольца [15, 16],  $B_z$  не превышала 8 мкТл, а горизонтальная составляющая  $B_x$  составляла: 0.8 мкТл ( $B = 7.9$  мкТл), 20 мкТл ( $B = 21.5$  мкТл), 60 мкТл ( $B = 60.5$  мкТл),

90 мкТл ( $B = 90.1$  мкТл). В скобках указан модуль абсолютного значения поля  $B$ .

Ранее уже было отмечено [1], что кинетики развития эффекта действия ММВ (облучение в ПМП с  $B = 49 \pm 5$  мкТл) имеют схожий характер: возрастание величины эффекта с последующим выходом на плато на временах 80–100 мин и уменьшением величины эффекта на временах до 300 мин (рисунок, кривая 1 и 2). Характер поведения кинетики был неизменен при облучении клеток (исследовались клетки *E. coli* и тимоциты крыс) ММВ с различной поляризацией, различной частоты, при различных уровнях плотности потока мощности, хотя знак и величина эффекта при этом могли изменяться [6, 17–19]. В отличие от ММВ, максимальный эффект действия на клетки ПМП проявляется на временах 50–80 мин после начала облучения (рисунок, кривая 4). Варьирование величины магнитной индукции ПМП приводило к изменению знака и величины эффекта, например, знак эффекта разнонаправлен при облучении ПМП с  $B = 25$  мкТл и с  $B = 42$  мкТл, хотя максимальный эффект в обоих случаях наблюдался на 60–80 мин [16].

Полученные данные по кинетике развития эффекта сочетанного действия ММВ и ПМП показали, что выбранное в экспериментах время инкубации 120 мин оптимально для наблюдения эффекта после облучения ММВ в ПМП  $B = 49 \pm 5$  мкТл (рисунок, кривая 2), в то время как для облучения в ПМП с  $B = 22 \pm 1$  мкТл это время 70 мин (рисунок, кривая 3).

В ходе проведенного исследования были получены статистически значимые эффекты ( $p < 0.05$ ) при облучении клеток ММВ в ПМП различной индукции (табл. 2). Как видно из таблицы, биологический эффект для выбранных частот наблюдался при ПМП величиной  $90 \pm 5$  мкТл. Облучение ММВ на частоте 51.755 ГГц было эффективно на всех исследованных величинах ПМП, а на частоте 51.675 ГГц оно было неэффективным только для  $B = 61 \pm 5$  мкТл.

Было проведено исследование частотной зависимости эффекта действия ММВ в диапазоне  $51.747 \pm 51.77$  ГГц с шагом 3 МГц при облучении клеток в ПМП с индукцией  $22 \pm 2$  мкТл и  $49 \pm 5$  мкТл. Из приведенных в табл. 3 данных видно, что при облучении клеток в ПМП с индукцией  $49 \pm 5$  мкТл наблюдается несколько рядом расположенных эффективных частот ММВ в области 51.752–51.762 ГГц. При облучении ММВ в ПМП с индукцией  $22 \pm 2$  мкТл значимое отличие в пределах погрешности было обнаружено только для частоты 51.755 ГГц.

Полученные в настоящей работе и опубликованные ранее [3] результаты обосновывают дальнейшее исследование модуляции резонансных

**Таблица 2.** Частотная зависимость величины эффекта ММВ (время облучения 10 мин, ППЭ =  $10^{-10}$  Вт/см<sup>2</sup>) от величины ПМП в момент облучения клеток

Частота, ГГц	Индукция магнитного поля В, мкТл				
	8 ± 1 мкТл	22 ± 2 мкТл	49 ± 5 мкТл	61 ± 5 мкТл	90 ± 5 мкТл
51.675	1.15 ± 0.03 <i>p</i> < 0.01	1.27 ± 0.01 <i>p</i> < 0.01	1.32 ± 0.03 <i>p</i> < 0.01	1.05 ± 0.03	1.16 ± 0.01 <i>p</i> < 0.02
51.755	1.4 ± 0.1 <i>p</i> < 0.02	1.19 ± 0.05 <i>p</i> < 0.05	1.30 ± 0.04 <i>p</i> < 0.002	1.10 ± 0.03 <i>p</i> < 0.05	1.18 ± 0.01 <i>p</i> < 0.001
51.835	1.01 ± 0.04	1.04 ± 0.04	1.05 ± 0.06	1.18 ± 0.09	1.19 ± 0.03 <i>p</i> < 0.02

Примечание. Время между облучением и лизисом 120 мин.

**Таблица 3.** Частотная зависимость эффектов ММВ (время облучения 10 мин, ППЭ =  $10^{-10}$  Вт/см<sup>2</sup>) при облучении в ПМП с индукцией 22 ± 2 и 49 ± 5 мкТл

ПМП, мкТл	Частота, ГГц						
	51.747	51.752	51.755	51.758	51.762	51.765	51.77
22 ± 2	1.03 ± 0.01	1.07 ± 0.08	1.2 ± 0.1*	1.08 ± 0.08	1.11 ± 0.06	1.2 ± 0.2	1.1 ± 0.2
49 ± 5	1.06 ± 0.04	1.10 ± 0.02*	1.26 ± 0.02*	1.22 ± 0.02*	1.14 ± 0.02*	1.04 ± 0.02	1.01 ± 0.02

Примечание. Время между облучением и лизисом 120 мин.

\* Уровень значимости *p* < 0.05.

эффектов микроволн с помощью дополнительно воздействия ЭМП.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена зависимость эффектов ММВ на клетки E. coli от величины ПМП и содержания кислорода в среде при облучении. Полученные данные указывает на сильную зависимость эффектов ММВ от физических параметров облучения и физиологических факторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков В.Л., Алипов Е.Д., Щеглов В.С., Беляев И.Я. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2006. В печати.
2. Belyaev I.Y., Shcheglov V.S., Alipov Y.D., Polunin V.A. // Bioelectromagnetics. 1996. V. 17(4). P. 312–321.
3. Гапеев А.Б., Якушина В.С., Чемерис Н.К., Фесенко Е.Е. // Докл. РАН. 1999. Т. 369. № 3. С. 404–407.
4. Aksyonov S.I., Bulychev A., Grunina T. et al. // Electro-Magnetobiology. 2001. V. 20. № 2. P. 231–253.
5. Belyaev I.Ya., Shcheglov V.S., Alipov Ye.D., Radko S.P. // Bioelectrochem. Bioenergetics. 1993. V. 31. P. 49–63.
6. Belyaev I.Ya., Shcheglov V.S., Alipov Ye.D., Ushakov V.L. // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2000. V. 48. № 11. P. 2172–2179.
7. Grundler W., Jentzsch V., Keilmann F., Putterlik V. // Ed. H.Frohlich N.Y.; Berlin; Heidelberg; London; Paris; Tokyo: Springer-Verlag, 1988. P. 65–85.
8. Балибалова Е.Н., Божанова Т.П., Голант М.Б., Реброва Т.Б. // Миллиметровые волны в медицине / Под ред. Н.Д. Девяткова, О.В. Бецкого. Т. 2. М.: ИРЭ АН СССР, 1991. С. 464–477.
9. Исмаилов Э.Ш., Хачиров Д.Г., Кудряшов Ю.Б., Исмаилова Г.Э. // Третий съезд по радиационным исследованиям, Москва, 14–17 октября, 1997 г. Тез. докл. Пушино, Т. 3. 1997. С. 56.
10. Belyaev I.Ya., Alipov Ye.D., Shcheglov V.S. // Electro-Magnetobiology. 1992. V. 11. № 2. P. 97–108.
11. Belyaev I.Ya., Alipov Ye.D., Shcheglov V.S., Lystsov V.N. // Z. Naturforschung. 1992. V. 47c. S. 621–627.
12. Строганов Н.С., Бузинова Н.С. Практическое руководство по гидрохимии. Изд-во МГУ, 1980. С. 54–65.
13. Belyaev I.Ya., Shcheglov V.S., Alipov Ye.D. // Bioelectrochem. Bioenergetics. 1992. V. 27. P. 405–411.
14. Belyaev I.Ya., Alipov Ye.D., Polunin V.A., Shcheglov V.S. // Electro-Magnetobiology. 1993. V. 12. P. 39–49.
15. Sarimov R., Markova E., Johansson F. et al. // Bioelectromagnetics. 2005. V. 26. P. 631–638.

16. Матрончик А.Ю., Алипов Е.Д., Беляев И.Я. // Биофизика. 1996. Т. 41. № 3. С. 642–649.
17. Alipov Ye.D., Belyaev I.Ya., Kravchenko V.G. et al. // Physics of the Alive. 1993. V. 1. № 1. P. 72–80.
18. Belyaev I.Ya., Alipov Ye.D., Shcheglov V.S. et al. // Electro-Magnetobiology. 1994. V. 13. P. 53–66.
19. Belyaev I.Ya., Shcheglov V.S., Alipov Ye.D., Polunin V.A. // Bioelectromagnetics. 1996. V. 17. P. 312–321.

Поступила в редакцию  
17.10.2005

## The Effects of Non-Thermal Microwaves on *E. coli* Cells Depend on Oxygen Concentration and Static Magnetic Field

V. L. Ushakov<sup>1</sup>, Ye. D. Alipov<sup>1</sup>, V. S. Sheglov<sup>1†</sup>, I. Ya. Belyaev<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Moscow Engineering Physics Institute (State University), Moscow, 115409, Russia; e-mail: VLUshakov@mephi.ru

<sup>2</sup>General Physics Institute, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Stockholm University, Stockholm, Sweden

The effects of non-thermal microwaves (MW),  $10^{-4}$  and  $10^{-10}$  W/cm<sup>2</sup>, on conformation of nucleoids in *E. coli* cells were analyzed by the method of anomalous viscosity time dependence (AVTD). MW exposure was performed at different values of static magnetic field and concentration of oxygen, 8–90  $\mu$ T, and 2.3–7.8 mg/l, respectively. It was shown, that slight changes in both static magnetic field and oxygen concentration result in significant changes of MW effects up to their disappearance. It was established, that changes in static magnetic field affected significantly the time kinetics of the MW effects. The obtained data provide further evidence for strong dependence of the effects of non-thermal microwaves on physical parameters of exposure and physiological factors. These dependences should be taken into account in replication studies. The obtained results encourage further investigation of possible modulation of non-thermal MW effects by additional electromagnetic fields.