

ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧАСТОТОЙ 51,8 И 53,0 ГГц НА РОСТ, СОДЕРЖАНИЕ ПИГМЕНТОВ, ФОТОВЫДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА И АКТИВНОСТЬ F_0F_1 -АТФазы ПУРПУРНОЙ БАКТЕРИИ *Rhodobacter sphaeroides*

© 2018 г. Л. Габриелян, В. Калантарян, А. Трчунян

Биологический факультет Ереванского государственного университета,
0025, Ереван, ул. А. Манукяна, 1, Армения

E-mail: Trchounian@ysu.am

Поступила в редакцию 13.05.17 г.

После доработки 13.03.18 г.

Показано, что облучение пурпурных бактерий *Rhodobacter sphaeroides* MDC6522, выделенных из минеральных источников Джермука в Армении, электромагнитным излучением крайне высоких частот в 51,8 и 53,0 ГГц в течение 15 мин приводит к заметному увеличению удельной скорости роста и фотовыделения H_2 . Однако при увеличении длительности облучения до 1 ч наблюдается достоверное уменьшение удельной скорости их роста в 1,6–2,0 раза, при этом максимальным эффектом обладает частота 53,0 ГГц. При облучении в 1 ч максимумы поглощения, типичные для каротиноидов, постепенно исчезают, уровень комплексов бактериохлорофилла *a* понижается. Продолжительное облучение также подавляет выход H_2 в течение роста бактерий до 72 ч, однако он восстанавливается через 96 ч роста. Падает активность N,N' -дициклогексилкарбодиимид-чувствительной протонной F_0F_1 -АТФазы в *Rh. sphaeroides*. Результаты указывают на то, что мембраносвязанная F_0F_1 -АТФаза может быть основной мишенью действия электромагнитного излучения крайне высоких частот. Полученные данные могут быть использованы в биотехнологии для регуляции роста и водородного метаболизма фототрофных бактерий.

Ключевые слова: *Rhodobacter sphaeroides*, электромагнитное излучение крайне высоких частот, рост бактерий, окислительно-восстановительный потенциал, выделение H_2 , F_0F_1 -АТФаза.

Одним из актуальных направлений современной биофизики является изучение действия электромагнитного излучения крайне высоких частот (ЭМИ КВЧ) на живые организмы. ЭМИ КВЧ (диапазон 40–100 ГГц), несмотря на то, что относятся к слабым и сверхслабым излучениям, обладают выраженной биологической эффективностью (от микроорганизмов до млекопитающих), вызывая как стимулирующие, так и подавляющие эффекты, которые проявляются уже при малых дозах при мощности потока до 0,005 мВт см⁻² [1–3].

В настоящее время большой интерес вызывает исследование действия ЭМИ КВЧ на микроорганизмы [2–4]. При этом КВЧ-излучение может обладать как стимулирующим, так и ингибирующим эффектом на рост бактерий.

В работах [5,6] было показано стимулирующее действие КВЧ-излучения на рост и выход биомассы различных цианобактерий. Также было показано, что ЭМИ КВЧ низкой интенсивности обладает выраженным бактерицидным эффектом, при этом действие ЭМИ на разные бактерии (*Escherichia coli*, *Enterococcus hirae*, *Lactobacillus acidophilus* и др.) зависит от частоты и продолжительности облучения, от аэробных или анаэробных условий культивирования бактерий, состава и pH ростовой среды и особенностей метаболизма исследуемых штаммов [7–10].

В основе действия ЭМИ КВЧ на бактерии могут лежать конкретные механизмы – изменение структуры и свойств воды (так как содержание воды в живых организмах достаточно велико, и бактерии в основном находятся в водной среде), а также изменения в мембранных белках и ДНК, которые могут быть возможными мишенями на клеточном уровне [1–3]. Самой вероятной мишенью действия КВЧ-излучения считается плазматическая мембрана

Сокращения: ЭМИ КВЧ – электромагнитное излучение крайне высоких частот, ОВП – окислительно-восстановительный потенциал, БХл *a* – бактериохлорофилл *a*, ДЦКД – N,N' -дициклогексилкарбодиимид.

клетки [2,3]. Показано, что при облучении ЭМИ КВЧ происходят мембранотропные изменения, связанные со структурой и поверхностными свойствами мембраны, переносом ионов и процессами превращения энергии [8,10]. Предполагается, что одной из мишеней действия КВЧ-излучения является мембраносвязанная протонная F_0F_1 -АТФаза [2,3]. Эти изменения могут лежать в основе бактерицидных эффектов ЭМИ КВЧ. Изучение влияния ЭМИ КВЧ на жизнедеятельность бактерий позволяет использовать полученные эффекты в биотехнологии и медицине.

Однако механизмы воздействия КВЧ-излучения на бактерии, особенно фототрофные, производящие молекулярный водород и потому представляющие интерес в биотехнологии, недостаточно изучены. Эффекты ЭМИ на разные бактерии отличаются друг от друга, и изучение действия КВЧ-излучения на пурпурные бактерии *Rhodobacter sphaeroides*, отличающиеся от изученных ранее бактерий составом и структурой плазматической мембраны и особенностями метаболизма, представляет интерес. Необходимо детальное изучение молекулярно-клеточных механизмов действия ЭМИ КВЧ на бактерии. Особенно актуальным представляется исследование влияния КВЧ-излучения на компоненты и активность клеточной мембраны, в частности работу протонной АТФазы, играющей важную роль в жизнедеятельности бактерий.

В данной работе впервые изучены параметры роста, изменение окислительно-восстановительного потенциала среды (ОВП), содержание бактериохлорофилла *a*, активность F_0F_1 -АТФазы и выделение H_2 у *Rh. sphaeroides* при воздействии низкоинтенсивного ЭМИ при частотах 51,8 и 53,0 ГГц. Более того, изменение роста бактерий и ОВП после облучения наблюдали в течение длительного времени (96 ч), что может указать на характер изменений и имеет важное прикладное значение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бактерии и их рост. В работе использовали пурпурную несерную бактерию *Rh. sphaeroides*, штамм MDC6522, выделенную из минеральных водных источников Джермука в Республике Армения (Центр депонирования микроорганизмов НАН Армении, Ереван, Армения, WDCM803).

Бактерию выращивали в анаэробных условиях на среде Ормерода в термостате при pH $7,5 \pm 0,1$, температуре $30 \pm 0,2^\circ\text{C}$ и освещении 2000 лк [11,12]. Для освещения использовали галогеновые лампы мощностью 60 Вт.

Интенсивность света измеряли люксметром LM37 (Carl Roth, Германия).

Рост *Rh. sphaeroides* контролировали путем измерения оптической плотности суспензии на спектрофотометре Spectro UV-Vis Auto (Labomed, США) при длине волны 660 нм [11,12]. Показания оптической плотности калибровали с учетом сухого веса бактерии. Удельную скорость роста (μ) определяли как частное от деления $0,693 (\ln 2)$ на время удвоения оптической плотности в интервале, когда изменение оптической плотности во времени носило линейный характер, и выражали в ч^{-1} : $\mu = 0,693/\tau$, где τ – время удвоения оптической плотности суспензии бактерий [11,12]. Продолжительность лаг-фазы определяли графически как время до начала логарифмической фазы. Определение сухой биомассы клеток бактерий проводили, как описано ранее [11]. pH среды определяли с помощью чувствительного pH-метра с селективным электродом типа HJ1131B (Hanna Instruments, США) и регулировали с помощью 0,1 М растворов NaOH и HCl [11,12].

Электромагнитное облучение бактерий. Облучение бактерий проводили генератором ЭМИ КВЧ (модель G4-141) с конической антенной (ГНПП «Исток», Фрязино Московской области, Россия), как описано ранее [5–8]. Генератор излучает когерентные электромагнитные волны с частотой 45–53 ГГц. Бактерии осаждали центрифугированием со скоростью 6000 об/мин в течение 20 мин и суспензировали в дистиллированной воде. Бактериальную суспензию (10 мл с толщиной суспензии 1 мм, плотность клеток приблизительно 10^7 клеток/мл) облучали ЭМИ с частотой 51,8 и 53,0 ГГц в режиме амплитудной модуляции с частотой 1 Гц (стабильность частоты сигнала составляла 0,05%; мощность потока – $0,06 \text{ мВт/см}^2$) в стерильных пластиковых чашках Петри при комнатной температуре в условиях естественного освещения (~1000 люкс) [10]. Амплитудную модуляцию осуществляли генератором низкочастотных сигналов ГЗ-118 (ГНПП «Исток», Фрязино Московской области, Россия). ЭМИ с данной мощностью потока не оказывает существенного влияния на температуру бактериальной суспензии, что было показано ранее [10]. Облучаемый объект находился на расстоянии 20 см от антенны, облучение проводили в дальней зоне антенны, и степень однородности распределения электромагнитного поля была достоверно высокой. Непосредственно после облучения суспензии в течение 15 мин и 1 ч бактерии переносили в свежую ростовую среду.

Определение мембраносвязанной активности бактерий. Для получения спектров поглощения

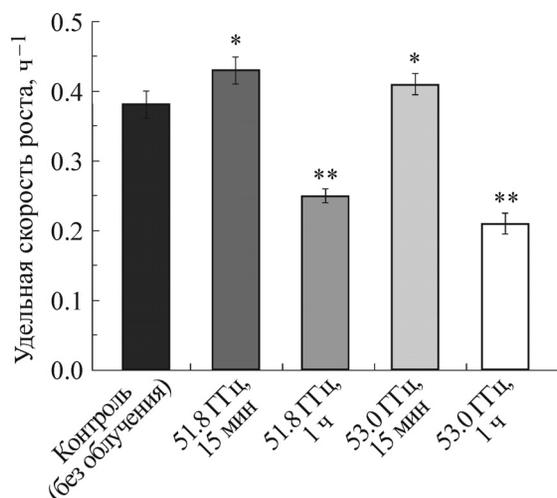


Рис. 1. Изменение удельной скорости роста *Rh. sphaeroides* после облучения КВЧ-излучением (51,8 и 53,0 ГГц) в течение 15 мин и 1 ч. * – Отличие от контроля достоверно, $p < 0,05$; ** – отличие достоверно, $p < 0,01$.

суспензии *Rh. sphaeroides* в диапазоне длин волн 400–1000 нм использовали спектрофотометр Spectro UV-Vis Auto (Labomed, США) [13]. Концентрацию бактериохлорофилла *a* (БХл *a*) в клетках определяли спектрофотометрически при 774 нм в этанольном экстракте [13,14].

Величину ОВП определяли с помощью цифровых иономеров И-160 МП (Гомельский завод измерительных приборов, Гомель, Беларусь) с использованием платинового (ЭПВ-01) и титан-силикатного (ЭО-21) электродов, как описано ранее [11,12]. Потенциал этих электродов (относительно электрода сравнения) в контрольном растворе, содержащем смесь ферро- и феррицианидов калия, составлял 254 ± 5 мВ при температуре 25°C. Титан-силикатный электрод нечувствителен к молекулярному водороду и кислороду и не способен катализировать окислительно-восстановительные реакции, что и определяет преимущество этого электрода по отношению к платиновому. Поэтому титан-силикатный электрод успешно используется для оценки окислительно-восстановительного состояния бактериальной суспензии, а платиновый электрод – для определения наличия O_2 или H_2 в среде. Разница в показаниях этих электродов позволяет определить выделение H_2 бактериями в анаэробных условиях [8,11,12]. Выход H_2 рассчитывали по изменению величины ОВП и выражали в ммоль H_2 на 1 г сухой биомассы, как описано ранее [12]. В отдельных экспериментах выделение H_2 подтверждали химическим методом, в основе которого лежит реакция обесцвечивания раствора перманганата

калия в серной кислоте при реакции с H_2 [11, 12,15].

АТФазную активность определяли по высвобождению неорганического фосфора (Φ_n) после реакции мембранных везикул с АТФ, как описано ранее [11]. Мембранные везикулы были получены по методу Конингса и Кэбака, а количество Φ_n определяли колориметрически по методу Тауски и Шора [11]. При использовании ингибитора F_0F_1 -АТФазы – *N,N'*-дициклологексилкарбодиимида (ДЦКД) – мембранные везикулы предварительно инкубировали с 0,5 М раствором ДЦКД в течение 10 мин.

Реактивы. В работе использовали реактивы аналитической чистоты (Carl Roth GmbH, Германия; Sigma Aldrich, США).

Обработка данных. При статистической обработке данных использовали компьютерную программу Excel 2010; приводятся средние арифметические значения из не менее трех независимых экспериментов со среднеквадратичным отклонением результатов измерений и критерием достоверности Стьюдента (p) для разницы результатов различных серий экспериментов [10,12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Действие электромагнитного излучения на рост бактерий. Нами было исследовано влияние КВЧ-излучения частотой 51,8 и 53,0 ГГц на параметры роста пурпурной бактерии *Rh. sphaeroides* MDC6522. Облучение *Rh. sphaeroides* ЭМИ КВЧ с частотой 51,8 ГГц в течение 15 мин приводило к заметному росту удельной скорости роста (рис. 1), тогда как частота в 53,0 ГГц не давала существенного эффекта. При увеличении продолжительности облучения до 1 ч происходило достоверное падение удельной скорости роста в 1,6–2,0 раза (рис. 1). Кроме того, облучение бактерий ЭМИ КВЧ в течение 1 ч приводило к заметному увеличению продолжительности скрытой фазы роста или лаг-фазы (не показано). При этом максимальный эффект наблюдался при частоте 53,0 ГГц, что совпадает с представлением о том, что данные частоты, возможно, являются резонансными для ряда бактерий [3,8], однако это требует дальнейших исследований.

Как известно, в процессе фототрофного роста пурпурных бактерий наблюдается синтез фотосинтетического аппарата, который состоит из двух светособирающих комплексов (БХл800–850 и БХл875), окружающих фотохимический реакционный центр [12,16]. В состав светособирающих комплексов входят белки и пигменты, такие как БХл *a* и каротиноиды.

Влияние КВЧ-излучения на концентрацию БХл *a* и фотовыделение H_2 у *Rh. sphaeroides* в процессе анаэробного роста

	Выход H_2 , ммоль на г сухой биомассы			БХл <i>a</i> , мг на г сухой биомассы
	48 ч	72 ч	96 ч	
Контроль (без облучения)	1,73 ± 0,10	5,58 ± 0,30	6,04 ± 0,30	14,60 ± 1,00
51,8 ГГц (15 мин)	3,00 ± 0,50	10,74 ± 0,30*	7,53 ± 0,30*	16,06 ± 1,00*
51,8 ГГц (1 ч)	–	–	2,03 ± 0,10**	7,65 ± 0,50*
53,0 ГГц (15 мин)	2,85 ± 0,20	8,82 ± 0,30*	7,23 ± 0,25*	15,70 ± 1,00*
53,0 ГГц (1 ч)	–	–	1,80 ± 0,10**	6,14 ± 0,50*

Примечание. Знаком (–) обозначено отсутствие выделения H_2 . * – Отличие от контроля достоверно, $p < 0,05$; ** – отличие достоверно, $p < 0,01$.

Для исследования влияния КВЧ-излучения на фотосинтетический аппарат были получены спектры поглощения клеток *Rh. sphaeroides* (рис. 2). Как показано, в спектре поглощения контрольных клеток в диапазоне длин волн 400–1000 нм наблюдаются несколько максимумов, типичных для пурпурных бактерий [12,16]. Эти максимумы указывают на наличие каротиноидов (450, 478 и 510 нм) и БХл *a* (590, 800, и 850 нм). Оказалось, что пигменты, входящие в состав *Rh. sphaeroides*, чувствительны к действию КВЧ-излучения. При облучении ЭМИ с частотой 51,8 ГГц в течение 1 ч максимумы поглощения, типичные для каротиноидов, постепенно исчезали (рис. 2), а также наблюдалось снижение уровня комплексов БХл800–850. Предполагается, что эти комплексы участвуют в аккумуляции и передаче световой энергии реакционному центру [12]. При этом после облучения ЭМИ КВЧ в течение 1 ч содержание БХл *a* было в среднем в два раза меньше, чем в контрольном образце (таблица), тогда как облучение в течение 15 мин почти не отражалось на концентрации БХл *a*. Уменьшение концентрации основного светособирающего пигмента также свидетельствует о подавлении роста *Rh. sphaeroides*.

Механизмы действия электромагнитного излучения на бактерии. Для выяснения механизмов действия КВЧ-излучения на *Rh. sphaeroides* определяли изменение ОВП, выделение H_2 целостными клетками бактерий и АТФазную активность мембранных везикул после облучения на частотах 51,8 и 53,0 ГГц в течение 15 мин и 1 ч.

ОВП является важным фактором, определяющим анаэробный рост бактерий, протекающий с высокой скоростью и сопровождающийся падением ОВП от положительных величин до отрицательных [11,17,18]. Падение ОВП указывает на повышение интенсивности восстанови-

тельных процессов, связанных с формированием конечных продуктов брожения, производством аминокислот, а также синтезом белков и других соединений, что, возможно, является типичным для метаболических процессов во время роста клеток в анаэробных условиях [17,18].

Связь между падением ОВП и фотовыделением H_2 была показана для *Rh. sphaeroides* [18, 19]. Как известно, в основе светоиндуцированного выделения H_2 пурпурными бактериями лежит процесс фотосинтеза [20]. Процесс фотовыделения H_2 катализируется нитрогеназой, тогда как гидрогеназа ответственна за поглощение (окисление) H_2 [11,20]. Катализируемое нитрогеназой выделение водорода требует поступление электронов от восстановленного ферредоксина, а также больших количеств АТФ, т.е. является энергозависимым процессом [20]. Восстановление протонов до H_2 наблюдается при строго восстановительных условиях. Важно участие гидрогеназы в производстве H_2 в оп-

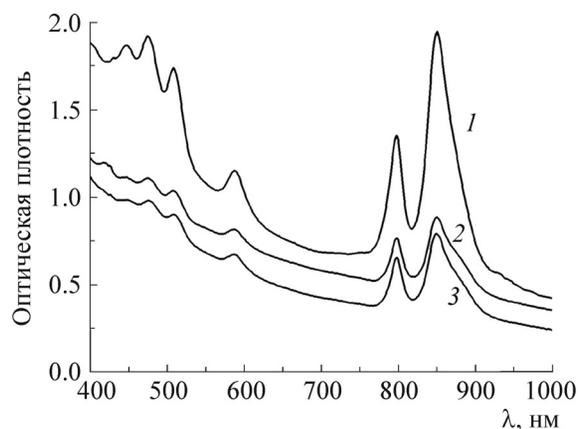


Рис. 2. Действие КВЧ-излучения на спектры поглощения целых клеток культуры *Rh. sphaeroides*: 1 – контрольные клетки (без облучения); 2 – при облучении с частотой 51,8 ГГц в течение 1 ч; 3 – при облучении с частотой 53,0 ГГц в течение 1 ч.

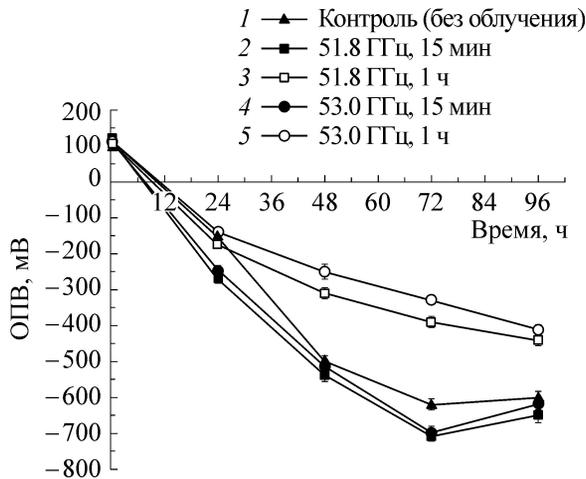


Рис. 3. Кинетика ОВП *Rh. sphaeroides* после облучения ЭМИ КВЧ. 1 — показания платинового электрода в контрольных клетках; 2, 3 — показания платинового электрода при облучении с частотой 51,8 ГГц в течение 15 мин и 1 ч соответственно; 4, 5 — показания платинового электрода при облучении с частотой 53,0 ГГц в течение 15 мин и 1 ч соответственно.

ределенных условиях [18,19], что требует дальнейших исследований.

Рост контрольных клеток *Rh. sphaeroides* в течение 72 ч сопровождался падением величины ОВП, определяемого с помощью платинового электрода, от положительных (100 ± 10 мВ) в начале лаг-фазы роста до низких отрицательных значений (-620 ± 15 мВ) (рис. 3); при этом изменения показаний титан-силикатного электрода были незначительными (не показано). При облучении на частотах 51,8 и 53,0 ГГц в течение 15 мин падение ОВП, определяемого с помощью платинового электрода, (72 ч роста) было более интенсивным: до (-710 ± 10 мВ) и (-700 ± 20 мВ) соответственно (рис. 3). Такое падение ОВП может свидетельствовать не только о повышении интенсивности восстановительных процессов, связанных с формированием различных продуктов фотоброжения, но и о фотовыделении H_2 [17,18]. При воздействии КВЧ-излучения в течение 1 ч ОВП среды не подвергался резким изменениям (рис. 3). Облучение бактерий приводило к замедлению падения ОВП: при частоте 51,8 ГГц ОВП понижался до (-390 ± 15 мВ), а при частоте 53,0 ГГц — до (-330 ± 10 мВ). Полученные данные свидетельствуют о том, что замедление падения ОВП может привести к подавлению роста бактерии.

Расчеты показали, что выход H_2 у *Rh. sphaeroides* (после облучения ЭМИ с частотой 51,8 ГГц в течение 15 мин) примерно в два раза (48–72 ч роста) превышал выход H_2 в

контрольном образце (без облучения) (таблица), тогда как выход H_2 после облучения с частотой 53,0 ГГц возрастал в ~1,6 раза по сравнению с выделением H_2 в контрольном образце. Интересным является тот факт, что после облучения ЭМИ с частотами 51,8 и 53,0 ГГц в течение 1 ч производства H_2 не наблюдалось в процессе анаэробного роста в течение относительно длительного времени (48–72 ч), что свидетельствует о полном ингибировании данного процесса. Однако через 96 ч роста выделение H_2 *Rh. sphaeroides* восстанавливалось (см. таблицу), что может указывать на наличие защитных или репарационных механизмов у исследуемой бактерии. В отличие от контрольного образца, выход H_2 был примерно в три раза ниже, что свидетельствует о подавлении нитрогеназной активности. При этом наибольшим ингибирующим воздействием обладала частота в 53,0 ГГц. Аналогичные данные были получены при исследовании других бактерий, например *E. coli* и *E. hirae* [5,6]. *Rh. sphaeroides* шт. MDC6521, выделенный из минеральных источников Арзни, оказался более чувствительным к действию КВЧ-излучения: выход H_2 после облучения с частотой 53,0 ГГц в течение 1 ч подавлялся примерно в семь раз [21]. Это может быть связано с физико-химическими особенностями источников, из которых были выделены данные штаммы. Вода минеральных источников Арзни (высота над уровнем моря — 1250 м) — натриево-хлоридного типа с температурой 12,0–22,0°C и pH 6,3–6,6, тогда как вода источников Джермука (высота над уровнем моря — 2100 м) — сульфатно-хлоридного типа с температурой 57–64°C и pH 6,5–8,5 [11]. Химический состав данных источников также отличается. Источники Джермука содержат натрий, калий, хлор, кальций, магний, железо и другие микроэлементы, необходимые для роста и метаболизма большинства фототрофных бактерий [22].

Так как фотовыделение H_2 осуществляется через различные мембранные механизмы, а именно с участием АТФ-зависимого фермента нитрогеназы и, возможно, протонной АТФазы (F_0F_1 -АТФаза), можно предположить, что КВЧ-излучение влияет именно на те компоненты мембраны, которые ответственны за данный процесс, в частности на активность протонной АТФазы. После облучения *Rh. sphaeroides* ЭМИ с частотой 53,0 ГГц в течение 15 мин наблюдался рост ДЦКД-чувствительной АТФазной активности в 1,3 раза, тогда как облучение бактерий ЭМИ с частотой 51,8 ГГц в 1,5 раза превышало АТФазную активность контрольного образца (рис. 4). АТФазная активность мем-

бранных везикул *Rh. sphaeroides*, подвергнутых облучению в течение 1 ч, была приблизительно в четыре раза ниже активности контрольного образца (рис. 4).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что протонная F_0F_1 -АТФаза этих бактерий может играть ключевую роль в бактериальных эффектах ЭМИ КВЧ. Возможно, эта АТФаза является первичной мишенью ЭМИ КВЧ, определяя его мембранотропное воздействие на бактерии [2,3].

Таким образом, полученные данные указывают на то, что действие ЭМИ КВЧ на *Rh. sphaeroides* зависит от продолжительности облучения. Кратковременное облучение (15 мин) приводит к стимуляции параметров роста этих бактерий, которая коррелирует с повышением фотовыделения H_2 . Возможно, что кратковременное облучение стимулирует фотосинтетическую активность пурпурных бактерий и как следствие этого выход H_2 . Эти результаты совпадают с данными, полученными относительно некоторых цианобактерий [9,10]. Увеличение длительности облучения до 1 ч приводит к подавлению роста бактерий, их фотосинтетической активности, выхода H_2 и активности F_0F_1 -АТФазы.

Полученные результаты свидетельствуют о мембранотропных механизмах воздействия КВЧ-излучения. Возможно, что в основе этих механизмов лежит резонансное (информационное) взаимодействие ЭМИ КВЧ [1–3], связанное с изменением свойств клеточной мембраны и ее компонентов, например протонной АТФазы. Следует заметить, что молекулы воды также могут быть мишенью КВЧ-излучения. Предполагается, что при облучении изменяется структура воды, приводя к повышению ее химической активности, что не может не отразиться на структуре, свойствах и функциях клеточной мембраны [2,3,23].

С учетом вышеперечисленного ЭМИ КВЧ может использоваться в медицине и биотехнологии для регуляции метаболизма, в том числе и водородного, у фототрофных пурпурных бактерий.

Авторы благодарны А. Саргсяну за помощь в отдельных экспериментах.

Работа выполнена в рамках базового финансирования и при финансовой поддержке Государственного комитета по науке Министерства образования и науки Республики Армения, грант № 15Т-1F123.

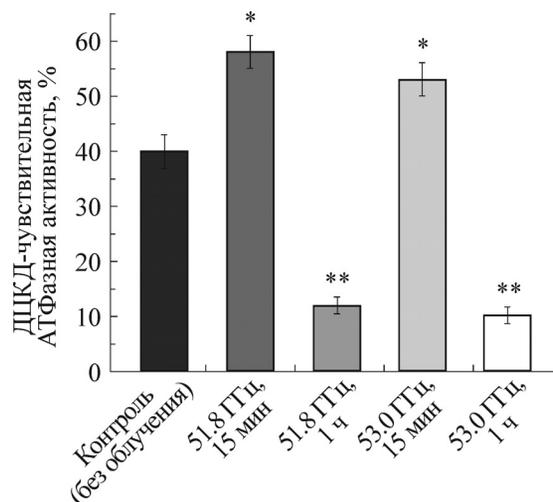


Рис. 4. Влияние КВЧ-излучения (51,8 и 53,0 ГГц) на ДЦКД-чувствительную АТФазную активность мембранных везикул *Rh. sphaeroides*. * – Отличие от контроля достоверно, $p < 0,05$; ** – отличие достоверно, $p < 0,01$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- O. V. Betskii, N. D. Devyatkov, and V. V. Kislov, Crit. Rev. Biomed. Eng. **28**, 247 (2000).
- D. Soghomonyan, K. Trchounian, and A. Trchounian, Appl. Microbiol. Biotechnol. **100**, 4761 (2016).
- H. Torgomyan and A. Trchounian, Crit. Rev. Microbiol. **39**, 102 (2013).
- S. M. Janković, M. Z. Milošev, and M. L. J. Novaković, Hospital Pharmacol. **1**, 102 (2014).
- A. X. Тамбиев, Биомед. радиоэл. **6**, 4 (2014).
- A. Kh. Tambiev and N. N. Kirikova, Crit. Rev. Biomed. Eng. **28** (3–4), 589 (2000).
- В. Оганян, А. Саркисян, А. Тадевосян и А. Трчунян, Биофизика **53** (5), 822 (2008).
- А. Тадевосян и А. Трчунян, Биофизика **54** (6), 1055 (2009).
- H. Torgomyan, V. Ohanyan, S. Ilbulyan, et al., FEMS Microbiol. Lett. **329**, 131 (2012).
- D. Soghomonyan and A. Trchounian, Cell Biochem. Biophys. **67**, 829 (2013).
- L. Gabrielyan, H. Sargsyan, and A. Trchounian, Microb. Cell Factory **14**, 131 (2015).
- H. Sargsyan, L. Gabrielyan, L. Hakobyan, and A. Trchounian, Int. J. Hydrogen Energy **40**, 4084 (2015).
- R. K. Clayton, Photochem. Photobiol. **5** (8), 669 (1966).
- З. Б. Намсараев, Микробиол. **78** (6), 836 (2009).
- T. Maeda and T. K. Wood, Int. J. Hydrogen Energy **33**, 2409 (2008).
- X. Hu, T. Ritz, A. Damjanovic, et al., Quarterly Rev. Biophys. **35**, 1 (2002).
- А. Василян и А. Трчунян, Биофизика **53** (2), 281 (2009).

18. L. Gabrielyan, H. Sargsyan, L. Hakobyan, and A. Trchounian, *Appl. Energy* **131**, 20 (2014).
19. X. Li, Zh.-Zh. Dai, T.-H. Wang, and S.-L. Zhang, *Int. J. Hydrogen Energy* **36**, 12794 (2011).
20. А. А. Цыганков и А. Н. Хуснутдинова, *Микробиология* **84**, 3 (2015).
21. L. Gabrielyan, H. Sargsyan, and A. Trchounian, *J. Photochem. Photobiol. B: Biology* **162**, 592 (2016).
22. B.-F. Liu, N.-Qi. Ren, J. Ding, et al., *Int. J. Hydrogen Energy* **34**, 721 (2009).
23. Н. И. Синицын, В. И. Петросян и В. А. Елкин, *Биомед. радиоэлектроника* **1**, 3 (1999).

The Effects of Electromagnetic Radiation at the Frequency of 51.8 and 53.0 GHz on Growth, Pigments Content, Hydrogen Photoproduction and F_0F_1 -ATPase Activity of Purple Bacteria *Rhodobacter sphaeroides*

L. Gabrielyan, V. Kalantaryan, and A. Trchounian

Faculty of Biology, Yerevan State University, ul. A. Manoukiana 1, Yerevan, 0025 Armenia

It has been shown, that exposure of purple bacteria *Rhodobacter sphaeroides* strains MDC6522 isolated from Jermuk mineral springs in Armenia to extremely high-frequency electromagnetic irradiation of 51.8 and 53.0 GHz for 15 min has led to a noticeable increase in specific growth rate of the bacteria and hydrogen photoproduction. However, an elongation of irradiation duration up to 1 h, caused a significant decrease in the specific growth rate by a factor of 1.6–2.0, the maximum effect was observed at the frequency of 53.0 GHz. Upon irradiation for an hour, absorption maxima, typical for carotenoids, gradually disappear and the level of bacteriochlorophyll *a* complexes decreases. Continuous irradiation also quenched the H_2 production during bacterial growth up to 72 h, although it is restored after 96 h of growth. The activity of the proton-pumping *N,N'*-dicyclohexylcarbodiimide-sensitive F_0F_1 -ATPase in *Rh. sphaeroides* also decreased. The results indicate that membrane-bound F_0F_1 -ATPase could be a main target of extremely high-frequency electromagnetic irradiation. The data obtained might have application in biotechnology for regulation of growth and hydrogen metabolism in phototrophic bacteria.

Keywords: Rhodobacter sphaeroides, extremely high-frequency electromagnetic irradiation, growth of bacteria, oxidation-reduction potential, H_2 production, F_0F_1 -ATPase