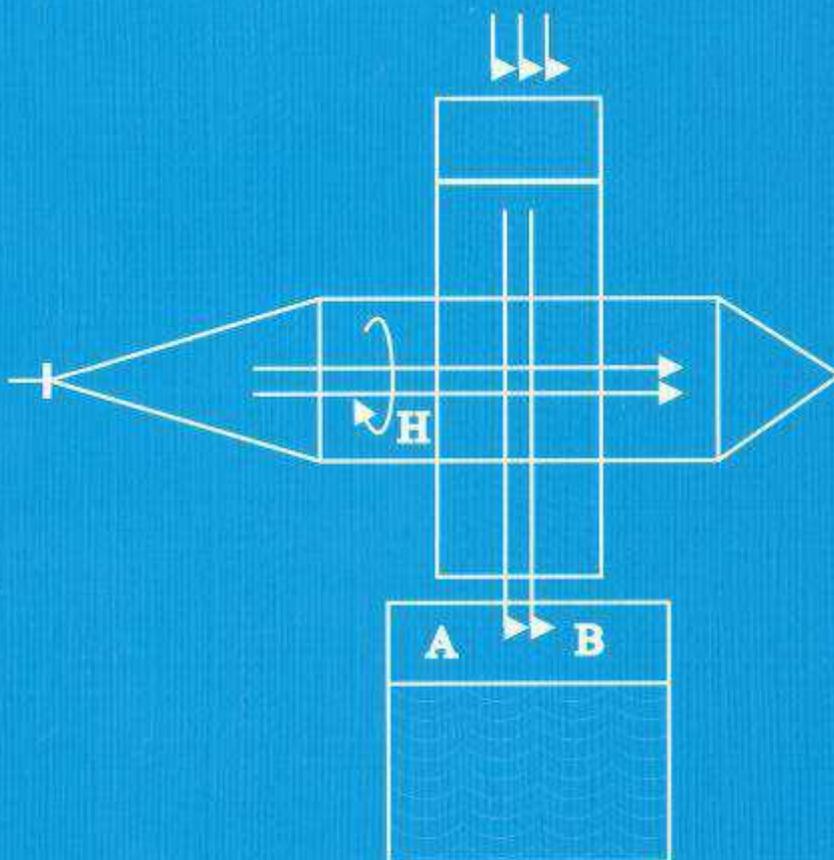


Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.Д. Усанов, А.П. Рытик

*БИОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ*



УДК [537.86:577.3](075.8)

ББК 22.336я73+28.071я73

У74

Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Усанов А.Д., Рытик А.П.

У74 Биофизические аспекты воздействия электромагнитных полей:

Учеб. пособие для студ. фак. нано- и биомед. технологий, обучающихся по спец. «Медицинская физика» и направлению «Биомедицинская инженерия». – Саратов:

Изд-во Сарат. ун-та, 2008. - 136 с.: ил.

ISBN 978-5-292-03829

В учебном пособии изложены биофизические аспекты взаимодействия электромагнитного излучения, постоянного и переменного магнитных полей с физическими средами и биологическими объектами. Описаны возможные механизмы, описывающие это взаимодействие. Материал пособия может применяться для подготовки лабораторных работ, гибко сориентирован на различный уровень подготовки студентов в рамках двухуровневой системы образования.

Для специалистов и научных работников, занимающихся исследованиями в области компьютерной диагностики в биомеханике, биофизике, биоинженерии и медицинской физике, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

Рекомендуют к печати:

Кафедра физики твердого тела и кафедра медицинской физики

Факультета нано- и биомедицинских технологий

Саратовского государственного университета

Доктор физико-математических наук Б. П. Безручко

УДК [537.86:577.3](075.8)

ББК 22.336я73+28.071я73

ISBN 978-5-292-03829

© Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Усанов А. Д.,
Рытик А. П., 2008

© Саратовский государственный
университет, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
1. Современное состояние исследований влияния электромагнитных полей на живые организмы	9
1.1. Эффекты воздействия средне- и низкочастотных электромагнитных полей на млекопитающих.....	9
1.1.1. Физиологические эффекты.....	9
1.1.2. Биохимические эффекты.....	11
1.1.3. Морфологические изменения в органах и тканях.....	14
1.2. Воздействие средне- и низкочастотных электромагнитных полей на обитателей водной среды.....	16
1.2.1. Дафния как экспериментальная модель для изучения особенностей действия гомеопатических препаратов.....	16
1.3. Воздействие средне- и низкочастотных полей на микроорганизмы.....	20
1.4. Воздействие средне- и низкочастотных электромагнитных полей на модели живых систем.....	21
1.5. Воздействие электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот на биологические объекты. Специфика терагерцового диапазона частот.....	24
2. Исследование влияния средне- и низкочастотных электромагнитных полей на биообъекты и физические среды	32
2.1. Лазерный автодинный датчик для тестирования биообъектов.....	32
2.1.1. Измерения частоты и амплитуды биений сердца дафнии.....	33
2.1.2. Эффект синхронизации внешним электрическим полем частоты сердцебиений дафнии.....	35
2.2. Воздействие переменного электрического поля на колебательные движения глаза дафнии.....	37
2.3. Влияние внешнего переменного магнитного поля на частоту сердцебиений дафнии.....	42
2.4. Зависимость частоты сердцебиения дафний от величины магнитного поля.....	47
2.5. Влияние магнитного поля на частоту сердечных сокращений дафний, помещенных в водный раствор фенола.....	49
2.6. Совместное действие постоянного и переменного магнитных полей на частоту сердцебиений дафнии.....	52

2.7.	Действие переменного магнитного поля на бактериальные клетки <i>Escherichia coli</i>	55
2.8.	Влияние переменного магнитного поля низкой интенсивности на физические характеристики зерновок сорго.....	59
2.9	Химические системы для индикации действия магнитного поля на воду	64
2.10.	Изменение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды на СВЧ при воздействии низкочастотного магнитного поля.....	69
2.11.	Определение влияния переменного магнитного поля на физические характеристики воды СВЧ-методом.....	74
3.	Методы и аппаратура для исследования воздействия электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот на физические и биологические среды	79
3.1.	Панорамно-спектрометрический комплекс.....	83
3.2.	Программное обеспечение для управления выходным спектром генератора.....	89
3.3.	Квазиоптические устройства для исследований воздействия на биосреды.....	92
3.3.1.	Рупорная антенна.....	92
3.3.2.	Делитель луча.....	93
3.3.3.	Экранированная согласующая нагрузка.....	95
4.	Воздействие электромагнитных колебаний терагерцового диапазона частот на форменные элементы крови	97
4.1.	Исследование изменений функциональной активности тромбоцитов при воздействии электромагнитного излучения на частотах спектра газов метаболитов.....	97
4.2.	Исследование влияния электромагнитного излучения на частотах спектра поглощения газа-метаболита – оксида азота на функциональную активность эритроцитов.....	97
4.3.	Исследование терагерцового индуцированного межклеточного взаимодействия в системе форменных элементов крови.....	101
4.4.	Изменение метаболических процессов в крови при воздействии электромагнитного излучения на частотах молекулярного спектра поглощения и излучения атмосферного кислорода.....	104
5.	Воздействие электромагнитных колебаний терагерцового диапазона частот на рост прокариотических клеток кишечной палочки <i>E.coli</i>	109
5.1.	Воздействие электромагнитного излучения на частотах из области спектра поглощения молекулярного кислорода на рост прокариотических клеток.....	109
5.2.	Аппаратура и методы исследования.....	109
5.3.	Результаты экспериментов и выводы.....	110

6.	Воздействие электромагнитных колебаний терагерцового диапазона частот на функциональное состояние дафнии.....	113
6.1.	Обоснование выбора объекта: дафния – экологический биотест–объект..	113
6.2.	Воздействие излучения терагерцового диапазона частот на функциональное состояние дафнии.....	114
6.3.	Изменение функционального состояния дафнии при воздействии потока атмосферного воздуха, возбужденного электромагнитным терагерцовым излучением.....	116
6.4.	Воздействие переменного магнитного поля и электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот на функциональное состояние дафнии.....	118
	<i>Список использованных источников.....</i>	<i>122</i>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных направлений биофизики является исследование взаимодействия электромагнитных полей с водной средой и живыми организмами. Опыт многолетних наблюдений показал, что некоторые электромагнитные поля представляют потенциальную угрозу для здоровья людей и являются не менее существенным климатическим фактором, чем температура, давление и влажность. По мере роста осознания этого факта задача изучения механизмов биологического действия электромагнитных полей становится все более актуальной.

Значительные трудности в проведении подобного рода исследований вносит тот факт, что практически нет соответствующих предсказательных теоретических моделей, так как исследуемые биообъекты являются сложными биологическими системами [1]. Например, в литературе не описаны специализированные биологические магниторецепторы, помимо частиц биомagnetита в некоторых бактериях, поэтому важно понять, каким путем сигнал магнитного поля трансформируется в отклик биологической системы. В низкочастотном диапазоне магнитное поле практически без каких-либо помех проникает в живую ткань. Оно действует на все частицы ткани, но не все частицы оказываются вовлеченными в процесс передачи информации о магнитном поле на биологический уровень. Первичные процессы взаимодействия магнитного поля с частицами материи, электронами, атомами, молекулами имеют чисто физическую природу. Заряженные частицы живого вещества, ионы и молекулы, участвующие в биофизических и биохимических процессах, являются, по-видимому, посредниками в передаче сигналов магнитного поля на следующий биохимический уровень. Тонкая регуляция активности белков ферментного типа, осуществляемая с участием ионов и молекул-посредников, приводит к смещению процессов метаболизма. Таким образом, по изменению концентраций продуктов метаболизма можно наблюдать действие магнитного поля.

При исследовании взаимодействия переменных магнитных полей с живыми организмами весьма полезными могут оказаться методы, осно-

ванные на оценке физиологических параметров биологических тест-объектов. В качестве тест-объектов могут быть использованы пресноводные рачки дафнии (*Daphnia magna* Straus). Дафний, как известно, применяют в качестве биотестов тонкой индикации степени загрязнения водной среды, в частности, различными химическими отходами (например, фенолом) [2].

В последние несколько лет появился ряд публикаций, например [3–5], свидетельствующих о том, что магнитное поле может влиять на биологические системы опосредованно через водную среду. В работе [2] отмечено наличие магнитного момента у молекулярных фрагментов воды, что свидетельствует об электронной природе взаимодействия воды с магнитным полем. Показано, что вода обладает длительной ориентационно-магнитной памятью.

Методики измерений, подтверждающих влияние магнитного поля на воду, как правило, характеризуются достаточно высоким уровнем сложности, поэтому может представлять интерес изучение влияния воздействия переменного магнитного поля на характеристики водной среды при использовании в качестве индикатора дафнии, являющейся признанным инструментом для биотестирования загрязнений воды. При этом магнитное поле может непосредственно действовать как на саму дафнию, так и на воду.

В последние 30 лет активно изучается также воздействие миллиметровых электромагнитных волн (ММ ЭМВ) на физические и биологические среды. За это время появилось новое направление физиотерапии – КВЧ-терапия [1], экспериментально были установлены частоты, на которых наблюдался эффект влияния электромагнитного излучения (ЭМИ) на клеточный метаболизм [2], а также частоты, на которых фиксировалось неблагоприятное воздействие ЭМИ на лабораторных животных [3]. Последнее стимулировало появление нового аспекта исследований – экологического.

Значительный интерес специалистов, занимающихся биомедицинскими технологиями, привлекает излучение в терагерцовом диапазоне частот (ТГц-диапазон) [1–6], который охватывает частоты от 100 ГГц до 10 ТГц (от 3 мм до 30 мкм). Это связано прежде всего с характерной для этого диапазона спецификой взаимодействия излучения с различными веществами, в том числе с биологическими средами. Термин «ТГц-диапазон» является удобным, поскольку объединяет большую часть диапазона частот, на которых проявляется отклик физических и биологических сред, рассматриваемых в работе. Этот диапазон включает в себя коротковолновую часть ММ-диапазона, весь субмиллиметровый и дальний (длинноволновый) ИК-диапазоны длин волн [7,8]. Также следует отметить, что энергия кванта в терагерцовом диапазоне частот будет на порядок больше, чем в КВЧ-диапазоне. Следовательно, можно ожидать, что в терагерцовом диапазоне реакционная способность молекул на воздействие излучения может быть существенно выше, чем в КВЧ-диапазоне [1,2,9].

Известно, что вода является сильным поглотителем коротковолнового ЭМИ, причем поглощение растет с увеличением частоты [2]. В работе [10] сообщается, что на кривой частотной зависимости ослабления плоского водного капилляра в диапазоне 0,4–0,5 ТГц наблюдаются резонансные окна «прозрачности» с уменьшением ослабления на 10–15 дБ. Излучение терагерцового диапазона частот свободно проходит через бумагу, дерево, некоторые строительные конструкции, пластики, керамику, а также через верхние слои кожи и одежду человека. В ряде европейских стран «экологически чистые» ТГц-волны уже используются для просвечивания пассажиров и груза в аэропортах, вместо вредных для здоровья рентгеновских волн [8,11]. Приведенные выше свойства ТГц-волн делают их привлекательными и для ряда других областей применения. В связи с этим можно лишь отметить, что сейчас наблюдается повышенный интерес (настоящий бум) специалистов к освоению и применению волн этого диапазона в биомедицинской физике, радиолокации, неразрушающем контроле.

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал по исследованию влияния электромагнитного излучения и магнитного поля на биологические объекты и физические среды. Одной из задач настоящего учебного пособия является ознакомление читателя с методиками исследования и предполагаемыми механизмами влияния электромагнитного излучения на биообъекты.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

1.1. Эффекты воздействия средне- и низкочастотных электромагнитных полей на млекопитающих

1.1.1. Физиологические эффекты

Более половины всех экспериментальных исследований по биологическому действию средних и низкочастотных электромагнитных полей выполнены на млекопитающих и около трети из них связаны с изучением физиологических эффектов. При этом большинство авторов, опубликовавших свои работы, отмечают их наличие.

Переменное магнитное поле частотой 50 Гц, начиная с 800 А/м, вызывает у крыс ориентировочную реакцию, проявляющуюся в учащении дыхания, принюхивании, повороте головы [6]. Постоянное магнитное поле напряженностью из интервала значений 24–32 кА/м повышает двигательную активность различных животных [7, 8, 9]. Постоянное магнитное поле 100 кА/м увеличивает двигательную активность морских свинок, а 190 кА/м вызывает ее угнетение [10]. Постоянное магнитное поле 320 кА/м уменьшает двигательную активность мышей на 60–80% [11]. Однако авторами этих работ не проведено изучение зависимости влияния постоянного магнитного поля от времени воздействия, поэтому остается неясным, почему выбор времени воздействия магнитного поля на подопытных животных в этих работах варьировался от нескольких минут до двух-трех суток и при каком времени достигался максимальный эффект. Не ясно также из каких соображений необходимо исходить при выборе величины индукции магнитного поля.

У крыс с предварительно выработанным условным рефлексом на пищевое подкрепление число правильных реакций на условный раздражитель снижалось на 7–40 % при действии переменного магнитного поля с частотой и напряженностью соответственно из интервалов 0,5–9 Гц, 4–40 А/м. Латентный период правильных ответов и отсроченных реакций увеличивается на 70–150 %. При этом отмечалась различная выраженность феномена в зависимости от амплитудно-частотных характеристик поля [12, 13], но не обращалось внимание на временной фактор.

О тормозящем действии магнитного поля на выработку условного рефлекса сообщалось и в других публикациях [14, 15, 8, 7, 16, 17].

Большая серия работ была проведена по изучению реакций на электромагнитное поле центральной нервной системы. Действие переменного магнитного поля амплитудой 0,01 А/м и частотами из диапазона от 0,001 до 0,01 Гц на крыс вызвало появление межполушарной асимметрии головного мозга [18]. В этом случае варьировалась частота воздействия при заданной амплитуде магнитного поля. При этом не ясно из каких соображений задавалась амплитуда действующего магнитного поля. Также не придавалось значения времени воздействия.

Постоянное магнитное поле напряженностью 40–56 кА/м снижало возбудимость гипоталамуса у крыс, а переменное магнитное поле 24–40 кА/м повышало ее [19]. Наиболее часто встречались сообщения о том, что под влиянием поля в электроэнцефалографии исследуемых животных появлялись высокоамплитудные веретена [19, 20, 8, 7, 21]. В этих работах также не исследовалась зависимость влияния магнитного поля от времени его воздействия и от частоты.

Значительное количество исследований проведено по изучению влияния на вегетативные функции организма млекопитающих переменного магнитного поля в диапазоне частот от 0,001 до 0,01 Гц при напряженности 0,01 А/м. Отмечалось, что такое воздействие вызывало брадикардию и колебания градиента квазистатического потенциала кожи у крыс, находящихся в сурдокамере. Однако и в этом случае не ясны основания выбора диапазона частот и значения напряженности магнитного поля. Не уделялось внимание также времени воздействия.

При хроническом действии переменного магнитного поля с напряженностью до 1000 А/м и с частотой из диапазона 0,5–8 Гц на кроликов, щенков собак отмечались отчетливые изменения в электрокардиограмме, ритме дыхания [22, 23, 24]. В этих экспериментах также не уделяется специального внимания времени воздействия. Выбор величины магнитного поля выглядит как случайный. Постоянное магнитное поле напряженностью менее 30 кА/м вызывало у собак, крыс, кроликов гипертонию, увеличение вольтажа электрокардиограммы, а при поле 48–80 кА/м аналогичное воздействие приводило к обратным результатам [11]. Суточная экспозиция кроликов в постоянном магнитном поле напряженностью 80 кА/м вызывало у них незначительное уменьшение частоты дыхания. Однако встречались отдельные животные, четко реагирующие урежением дыхания, причем эта реакция сохранялась у них в последствии [24]. В исследовании тех же авторов постоянное магнитное поле напряженностью 360 кА/м, действовавшее 30 мин на кроликов, вызывало уменьшение частоты дыхания на 30 %, частоты сердечных сокращений – на 11%. Нормализация всех показателей наступала через сутки после прекращения действия поля. Авторами не исследовалось влияние на характер реакции частоты переменного магнитного поля, не обоснован выбор времени воздействия. Не ясна причина различия в реакциях на воздействия у различных особей. Выбор

значения напряженности магнитного поля выглядит как случайный. В то же время некоторые авторы не зарегистрировали изменения электрокардиограммы в переменном магнитном поле напряженностью менее 1200 кА/м [25, 26, 27].

Значительно меньший объем исследований проведен по регистрации физиологических эффектов у млекопитающих под воздействием электрических полей. У щенков, котят, кроликов отмечались отчетливые изменения в характере электрокардиограмм, электроэнцефалографии, частоты сердечных сокращений при воздействии переменного электрического поля 0,1–8 Гц, 0,7–80 В/м. У молодых животных изменения возникали быстрее и были более выраженными. Наблюдалась также амплитудно-частотная зависимость результатов, однозначно не связанная с величиной и частотой поля. Все отмеченные изменения были обратимыми [28, 29, 22, 23, 30, 31]. Наряду с этим ряд авторов получили неопределенные результаты при действии на крыс, морских свинок и мышей переменным электрическим полем промышленной частоты напряженностью 50–1100 кВ/м [32], при этом ими также не исследовалась зависимость влияния воздействия переменного электрического поля от времени.

Подводя итог серии физиологических исследований на млекопитающих, можно отметить, что эффекты электромагнитных полей наблюдаются при различных частотах, напряженностях, причем однозначной зависимости эффекта от напряженности или частоты выявить не удалось. Кроме того, не исследована зависимость влияния электромагнитных полей от времени действия, не обоснован выбор величины напряженности и частоты действующего магнитного поля. Несмотря на многообразие исследований, они не создают впечатления системных. Не ясны также общие закономерности, наблюдающиеся в результате воздействия, и специфика воздействия для различных биологических видов. Отсюда воздействие именно на тот, а не иной биологический вид не выглядит обоснованным. Если ввести еще и временной фактор воздействия, становится ясно, что для формулирования обобщенных выводов объем экспериментов должен был бы быть значительно увеличен и детализирован в описании параметров воздействия.

1.1.2. Биохимические эффекты

В серии работ [22, 23, 30, 33] изучалось влияние средне- и низкочастотных электро-магнитных полей напряженностью 10^{-5} – 10^{-2} А/м и 0,07–7 В/м, частотой от 0,01 до 80 Гц на различные биохимические показатели кроликов, крыс, мышей. Отмечалось достаточно явное влияние поля на активность пероксидазы крови, обеднение клеток сердечной мышцы нуклеиновыми кислотами, изменение содержания в крови альбуминов и глобулинов, снижение активности щелочной фосфатазы, гликогена М-надоксидазы. Направление изменений и их величина существенным образом зависели от амплитудно-частотных характеристик поля, состояния изучаемого биообъекта, условий проведения опыта. Этот вывод резко ог-

раничивает общность и прогнозируемость результатов воздействия. Через непродолжительное время после прекращения воздействия все биохимические показатели возвращались к норме [22, 23, 30, 33].

Стимуляция органов и тканей симпатoadреналовой системы, снижение уровня метаболических процессов в гонадах наблюдались при действии на подопытных животных переменного магнитного поля с параметрами: 6 А/м, 8 Гц [34]. В переменном электрическом поле 1 кВ/м, 50 Гц при хроническом воздействии снижался синтез АТФ в мозгу у крыс. При действии переменного электрического поля напряженностью 2 кВ/м в моче увеличивается содержание 17-ОКС на 20–60 %. В поле 5 кВ/м начинал уменьшаться синтез АТФ в печени. Связывание белками крови йодсодержащих комплексов возрастало в поле 1–5 кВ/м на 80% [35,36]. Нарушения белкового, углеводного, минерального и энергетического обмена наблюдались при хроническом действии на крыс переменного электрического поля частотой 50 Гц и амплитудой 0,5–15 кВ/м [37]. При длительном действии переменного электрического поля 50 кВ/м, 50 Гц на крыс и кроликов отмечались гипогликемия у кроликов и гипергликемия у крыс [38]. Однако у мышей, содержащихся в переменном электрическом поле напряженностью 5 кВ/м, биохимических изменений обнаружено не было [39]. Выбор значения напряженности магнитного поля и значения частоты выглядит необоснованным, нет также и специального исследования влияния на результат временного фактора.

В работах, выполненных под руководством В.В. Соколовского [9, 22, 40, 41], отмечалось, что импульсное магнитное поле, представленное последовательностью знакопеременных прямоугольных импульсов 36 А/м, а также синусоидальных переменных магнитных полей 0,5 и 50 Гц той же напряженности, вызывало изменение активности ферментов энергетического обмена, меняло структуру белков, гемоглобина, мембрану эритроцитов. Величина и знак эффекта зависели от параметров используемого поля, выбранных тестов, изучаемых органов. Существенным являлось то, что ряд тестов при действии одного и того же поля одновременно давал разнонаправленный достоверный сдвиг, заключающийся в том, что однородная до опыта выборка под действием поля разделялась на две, одна из которых свидетельствовала о «стимулирующем действии фактора», другая – о «тормозящем» [9, 22, 40, 41]. Эти эксперименты также создавали впечатление неоднозначности результатов воздействия влияния на результат воздействия большого числа различных факторов, отсутствия выявленных общих тенденций.

В исследованиях Ф.А. Колодуба [42] изучалось действие переменного магнитного поля и импульсного магнитного поля частотой 7–50 Гц и напряженностью 10 А/м – 72 кА/м на крыс. Регистрировалось до 30 различных биохимических показателей, почти при всех режимах воздействия отмечалось их изменение. Наиболее часто встречалось снижение на 20–40% содержания гликогена, глюкозы, АТФ, креатинфосфата, реже наблюдалось

их аналогичное повышение. Четкой зависимости степени проявления эффекта от параметров воздействующего поля установлено не было.

Изменение показателей азотистого, нуклеинового, углеводного обмена у крыс отмечалось при длительном действии переменного магнитного поля амплитудой 75–750 А/м и частотой 50 Гц. При напряженности 7,5–32 кА/м эффект был более выражен и достигал 10–80% от уровня контроля. Прерывистое воздействие полем приводило к более сильным изменениям [41]. Поле 80 А/м из диапазона 0,6–2 Гц изменяло активность дегидрогеназ у крыс. Эффект существенно зависел от частоты, длительности и режима воздействия [43]. Несмотря на вариации различных факторов воздействия, сделать обобщающие выводы по результатам этих экспериментов также представляется затруднительным.

Под руководством Н.А. Удинцева проведена большая серия биохимических исследований на крысах по изучению действия переменного магнитного поля промышленной частоты напряженностью 16 кА/м и длительностью от минут до многих суток как в непрерывном, так и в прерывистом режиме. Установлено, что поле начиная с 15-минутного воздействия, изменяет динамику углеводного обмена в миокарде [44], перекисное окисление липидов [40], активность дегидрогеназ [77], функцию гипофизарно-надпочечниковой системы [45], семенников [46], инсулина крови [9], биохимические показатели эритроцитов [20]. В результате проведенных исследований делается вывод о том, что непрерывное воздействие полем оказывает стимулирующий эффект на гипофизарно-надпочечниковую систему, активируя ее метаболизм, а прерывистое воздействие снижает ее активность, угнетая деятельность эндокринных желез [47, 41]. Однако авторами этих работ не обоснован выбор параметров переменного магнитного поля, что резко снижает прогностическую общность наблюдаемых результатов.

Действие переменного магнитного поля напряженностью 12 кА/м и частотой 50 Гц на мышей снижает активность АТФ-азы в почках на 17–60%. Выраженность реакции зависит от режима воздействия [48]. Стимуляция процессов дыхания у крыс отмечена при действии переменного магнитного поля 40 кВ/м, 0,033 Гц [49]. Переменное магнитное поле амплитудой 64 кА/м и частотой 100 Гц уменьшало содержание неорганического и органического фосфора у мышей на 29 и 44% [50]. В этих экспериментах выбор значений магнитного поля выглядел случайным, что, в свою очередь, придает наблюдаемым результатам частный характер.

Определенные биохимические изменения вызывают постоянные магнитные поля большой напряженности. При 24 кА/м наблюдается угнетение аэробного синтеза АТФ, но отсутствует гиперпродукция кортикостероидов у крыс [18]. Однократное воздействие постоянного магнитного поля 36 кА/м в течение нескольких часов активизирует процессы окисления у крыс, а многократное – ингибирует [40]. При 80 кА/м вначале скорость синтеза РНК в костном мозгу уменьшается, а при продолжающемся воздействии восстанавливается [18]. При суточном воздействии постоянного

магнитного поля той же напряженности изменений концентрации АТФ, АДФ, АМФ в крови не обнаружено [24]. Постоянное магнитное поле 104 кА/м увеличивало у крыс содержание молочной и пировиноградной кислот на 40—60 % [43]. В поле 160 кА/м у крыс и кроликов при однократном и многократном воздействии изменилось соотношение сывороточных белков крови, концентрация микроэлементов в различных органах и тканях, ионный состав эритроцитов [14]. Изменения в различных органах и тканях были разнонаправленными и зависели от режима воздействия. Этот вывод как бы подчеркивает отсутствие в результате исследований выявленных тенденций, носящих общий характер. Свертываемость крови, содержание в ней фибриногена и адгезия тромбоцитов изменились после воздействия постоянного магнитного поля 200 кА/м на голову кролика [50]. У крыс после 10-дневного воздействия постоянным магнитным полем 208 кА/м содержание общего белка сыворотки крови увеличивалось на 25–30 %, однако после 20-дневного воздействия опытные данные не отличались от контрольных [10]. После часового воздействия постоянным магнитным полем 360 кА/м у крыс наблюдались изменения в ионном составе крови [24]. Такие же изменения выявлены у мышей и крыс при действии постоянного магнитного поля 400 кА/м [51].

Подводя итог вышеизложенному, можно сделать вывод о том, что достоверные статистически значимые изменения биохимических процессов у млекопитающих можно зарегистрировать при действии на них электромагнитных полей напряженностью от долей А/м и выше. Изменения обычно не превышают 30–40% от уровня контроля, редко достигая 60–80%, и сравнительно быстро возвращаются к норме после прекращения воздействия. На направленность и выраженность реакций в большой степени влияют исходное состояние организма и режим воздействия. Однако явная зависимость величины изменений от напряженности действующего поля или частоты не прослеживается. Кроме того, авторы не обосновывают выбор параметров действующих полей и время, в течение которого они действуют, поэтому остается неясным, почему в экспериментах использовались те или иные частоты и амплитуды. Изучается действие полей на сложные биологические объекты, жизнедеятельность которых характеризуется большим количеством взаимозависимых показателей. Выделить из них наиболее значимые с точки зрения воздействия полей представляется затруднительным. Используя различные типы биологических объектов, исследователи не ставили цели выявить общие для них результаты воздействия электромагнитных полей.

1.1.3. Морфологические изменения в органах и тканях

Часто морфологические изменения в органах и тканях млекопитающих наблюдались при низких частотах воздействующих электромагнитных полей. Так при длительном действии переменных электрических полей частотой 8 Гц и напряженностью 0,8 В/м уже через двое суток у мор-

ских свинок появлялись явные морфологические изменения. Наблюдалась дегенерация отдельных мышечных волокон, возникали очаги некроза в миокарде, отеки. Также появлялись признаки нарушения кровообращения, повышенной сосудистой проницаемости, свежие очаги миомаляции. При действии полем тех же параметров на кроликов с предварительно вызванным инфарктом миокарда отмечалось усиление дистрофических и некробиотических процессов [22]. Переменное электрическое поле частотой 8 Гц и амплитудой 0,7 В/м, действующее в течение нескольких суток на крольчих в период течки и беременности, приводило к возникновению дегенеративных изменений фолликулов, уменьшению числа имплантированных зародышей, изменению их конфигурации и, как следствие, к меньшей рождаемости и увеличению числа мертворожденных [23]. Можно обратить внимание на то, что, не обосновывая специально, из всего многообразия частот различные авторы чаще других выбирают частоту 8 Гц.

При действии переменных электрических полей (50 Гц, 10–25 кВ/м) на мышцах наблюдались изменения интерстициальной ткани семенников, уменьшение площади фолликулов щитовидной железы. Нарушения сперматогенеза выявить не удалось, но самцы одной из линий после воздействия полем 15 и 25 кВ/м оказались бесплодными [48]. Однако другие авторы, действовавшие на крыс, кроликов, собак переменным электрическим полем частотой 50 Гц и напряженностью из диапазона от 17 до 160 кВ/м, не отмечали каких-либо изменений генеративной функции [38], то есть результаты этих исследований выглядят как противоречивые.

При действии на мышей переменным электрическим полем частотой 50 Гц и амплитудой от 230 до 635 кВ/м отмечались существенные изменения в паренхиматозных органах, коже и нервно-мышечной системе, что, по мнению автора [52], связано с глубокими нарушениями обмена и аутоинтоксикацией. В этом случае рассматривался другой интервал воздействующих магнитных полей и влияние воздействий на другие характеристики биообъектов, что вновь затрудняет выявление общих закономерностей.

Хроническое действие в течение нескольких суток переменного магнитного поля 0,01–14 Гц, 0,005–5 А/м синусоидальной и прямоугольной формы на крыс вызывало гистохимические и гематологические изменения в пределах до 20–660 %, неоднозначно зависящие от амплитудно-частотных характеристик поля [22]. Переменное магнитное поле 0,5–20 Гц, 40–50 А/м, действовавшее на крыс в течение 60 ч, привело к изменению проницаемости мембран, что определялось по изменению сорбции красителя клетками печени [53]. Постоянное магнитное поле 240 А/м, действовавшее на крыс в течение месяца по 10 минут в день, вызвало увеличение диаметра капилляров, аргирофилию нервных окончаний, увеличение диаметра мышечных волокон [18]. Постепенно меняющееся от 0 до 240 А/м постоянное магнитное поле вызывало снижение митотического индекса костного мозга, увеличение клеток лейкоцитарного ряда, числа двуядерных гепатоцитов у мышей на 10–60%. Эффект существенно зависел от направленности поля по отношению к продольной оси животного и

от сезона [11]. Используя постоянное магнитное поле и переменное магнитное поле 50 Гц напряженностью от 240 до 560 кА/м, авторы [43, 54, 49, 55, 11] показали, что при любых параметрах поля, действовавшего на мышей, крыс, морских свинок, кроликов от 15 мин до многих месяцев, практически во всех тканях и органах наблюдались отчетливо регистрируемые морфологические изменения. Наиболее типичными являются набухание клеток различных органов, появление отеков, расширение капилляров, жировая дистрофия, отдельные кровоизлияния. «Шоковым» органом, по терминологии авторов, являются семенники, где обнаруживается резкое обеднение зрелыми клетками сперматогенного эпителия. Однако все эти изменения обратимы и в последствии (а в ряде случаев при продолжающемся действии) возвращаются к норме. Морфологические изменения в нервной ткани, миокарде, почках, печени, митохондриях, картине митотической активности крови, кровеносных сосудах у различных животных отмечались в постоянных, переменных и импульсных магнитных полях 400 А/м – 500 кА/м многими авторами [7, 9, 11, 56, 55].

Серия работ с постоянным магнитным полем большой напряженности (от 30 до 10400 кА/м) выполнена под руководством З. Н. Нахильницкой [12, 24, 48, 57, 58]. Авторами показано, что поле понижает митотическую активность эпителия роговицы, причем первичный эффект в интервале 30–240 кА/м пропорционален напряженности и быстро нормализуется при продолжающемся действии. Изменения в костном мозгу появляются только в первые часы после начала действия полем и уже через сутки могут не обнаруживаться. Постоянное магнитное поле 10400 кА/м вызывало более слабые изменения митотической активности роговицы, чем поля 240–640 кА/м, и не приводило к резким расстройствам функций и гибели животных [10, 11, 12, 24, 48, 57, 58; 59]. Совокупность морфологических изменений, наблюдающихся под действием электромагнитных полей, позволяет считать, что в большинстве случаев регистрируемые нарушения не являются катастрофическими. Нарастая в первые сутки воздействия, они постепенно стабилизируются, уменьшаются и возвращаются к норме. Наиболее сильные изменения обнаруживаются в органах и тканях с повышенным уровнем метаболизма, но и в этом случае наблюдается четкая тенденция к нормализации после прекращения действия поля. Однако авторы этих работ не обосновывают выбор параметров электромагнитных полей, поэтому остается неясным, почему в экспериментах использовались те или иные частоты и амплитуды. В одних работах воздействие проводилось в течение нескольких минут, а в других несколько суток и более, поэтому неизвестно в каком случае достигается максимальный эффект.

1.2. Воздействие средне- и низкочастотных электромагнитных полей на обитателей водной среды

Большая серия исследований выполнена на обитателях водной среды, которая в отличие от воздушной обладает электропроводностью. В работе

[60] показано, что пороговая чувствительность к электрическому полю рыб, обладающих электрорецепторами, лежит в пределах от 10^{-6} до 10^{-2} В/м, и ими воспринимаются токи плотностью 10^{-10} – 10^{-7} А/м². Рыбы, не обладающие электрорецепторами, воспринимали электрическое поле напряженностью от десятков долей до десятков В/м при плотности тока 10^{-7} – 10^{-2} А/см² [39]. Это позволяло им реагировать на внешние электромагнитные поля биогенного и абиогенного происхождения [39, 61, 62, 63].

Ориентировались в геомагнитном поле и искусственном постоянном магнитном поле 400 А/м вольвокс и улитки [64, 65]. Планарии воспринимали электрическое поле 10^{-5} В/м и магнитное поле 3,2 А/м [64, 66]. Характер движения парамеций изменялся в зависимости от направления постоянного магнитного поля 14–100 А/м [64].

Нейрофизиологические исследования также подтвердили наличие высокой чувствительности электрорецепторов у скатов к электрическому полю [61]. По условно-рефлекторной методике была определена величина пороговой чувствительности неэлектрических рыб к магнитному полю, которая оказалась равной 800–3200 А/м. Органом, воспринимающим поле, по мнению автора [8], является промежуточный мозг. В основе магниторецепции некоторых водных животных может лежать обнаруженный у них биогенный магнетит. Такие включения имеются у скатов, дельфинов, акул, саламандр, тритонов [67, 68].

Таким образом, показано, что имеется ряд животных, обитающих в водной среде, которые обладают высокой чувствительностью к электрическим и магнитным полям за счет имеющихся у них электро- и магниторецепторов. Однако существует большой класс биологических объектов, обитающих в водной среде, у которых, в частности, магниторецепторы обнаружены не были.

1.2.1. Дафния как экспериментальная модель для изучения особенностей действия гомеопатических препаратов

Действие сверхмалых доз различных веществ на биологические объекты целесообразно изучать с помощью тест-объекта, в качестве которого может быть использована дафния [191–199].

Влиянием сверхмалых доз различных химических препаратов на функциональное состояние отдельных органов, систем и даже ферментов может объясняться и эффект воздействия на организм гомеопатических препаратов – лекарственных средств, приготовленных по особой технологии.

Жидкие гомеопатические препараты готовят путем разведения исходного сырья (растительного, минерального или животного происхождения) в разводящей жидкости с обязательным потенцированием (встряхиванием) после каждого разведения. Разведения чаще всего производят по двум шкалам: десятичной и сотенной. Десятичные разведения обозначают знаком «Д» или «Х». Сотенные разведения – знаком «С» или соответствующим

щим числом без знака. Первое десятичное разведение должно содержать 1/10 часть лекарственного вещества. Каждое последующее разведение готовится из одной части предыдущего разведения и 9 частей разводящей индифферентной жидкости. Первое сотенное разведение должно содержать 1/100 часть лекарственного вещества. Каждое следующее разведение готовится из одной части предыдущего разведения и 99 частей разводящей индифферентной жидкости (рис.1).

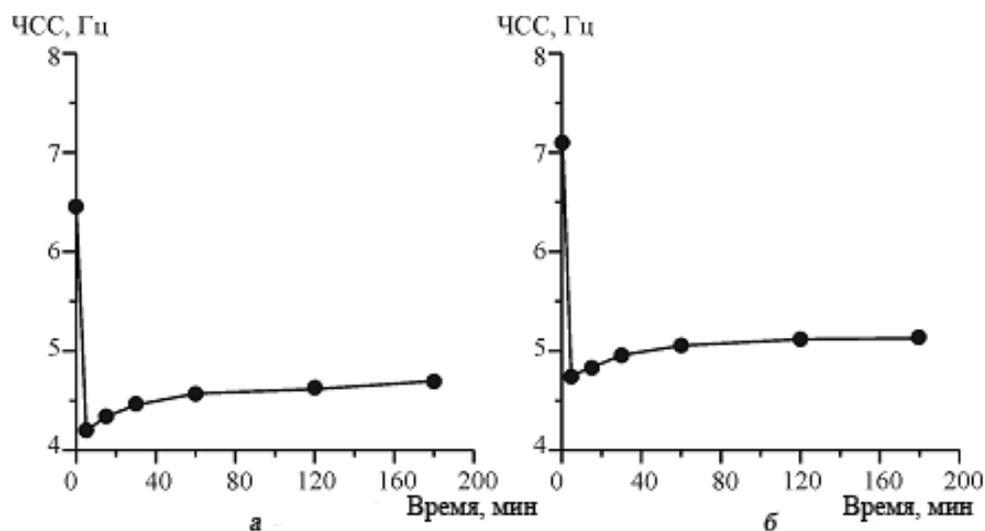


Рис. 1. Зависимость ЧСС дафнии от времени: *а* – при помещении в среду обитания после воздействия фенола концентрацией 50 мг/л; *б* – при помещении в раствор молочного сахара после воздействия фенола концентрацией 50 мг/л

Экспериментально показано, что даже в низких потенциях (Д3–Д12), содержащих молекулы исходного вещества, действие гомеопатических препаратов и обычных разведений в той же самой концентрации различно [200]. При гомеопатических разведениях выше 12С, по-видимому, необходимо предполагать существование совершенно иного механизма воздействия на биологические объекты по сравнению с известными.

Измерялась зависимость частоты сердечных сокращений (ЧСС) дафний от времени при воздействии на нее различных веществ. Предварительно каждую дафнию помещали в раствор фенола с концентрацией 50 мг/л на 5 минут, т.е. подвергали стрессовому воздействию, затем на 5 минут в среду обитания с растворенным в ней индифферентным веществом – крупой молочного сахара; раствором гомеопатического препарата *Digitalis* в различных потенциях (рис. 2, *а, б, в*), раствором потенцированного фенола (С6) (рис. 2, *г*), затем вновь в среду обитания. Контрольную группу составили дафнии, помещенные после воздействия фенола в среду обитания.

Как следует из результатов, приведенных на рис. 1, во всех сериях эксперимента воздействие фенола в концентрации 50 мг/л достоверно замедляет ЧСС дафнии. Восстановление исходного состояния сердечной

деятельности не происходило при помещении дафнии в среду обитания или среду с растворенным индифферентным веществом – молочным сахаром (см. рис. 1, *а, б*). Помещение дафнии после воздействия фенола в растворы Digitalis в потенциях С6, С30, С1000 приводило к восстановлению ЧСС приблизительно до исходного уровня (см. рис. 2, *а, б, в*).

Выбор Digitalis в данной экспериментальной модели обусловлен тем, что его токсические дозы, так же как и токсические дозы фенола, оказывают однотипное действие на сердечную мышцу человека [200].

Разнонаправленное действие токсических доз вещества и приготовленного из него гомеопатического препарата демонстрирует эксперимент с потенцированным фенолом (рис. 2, *г*).

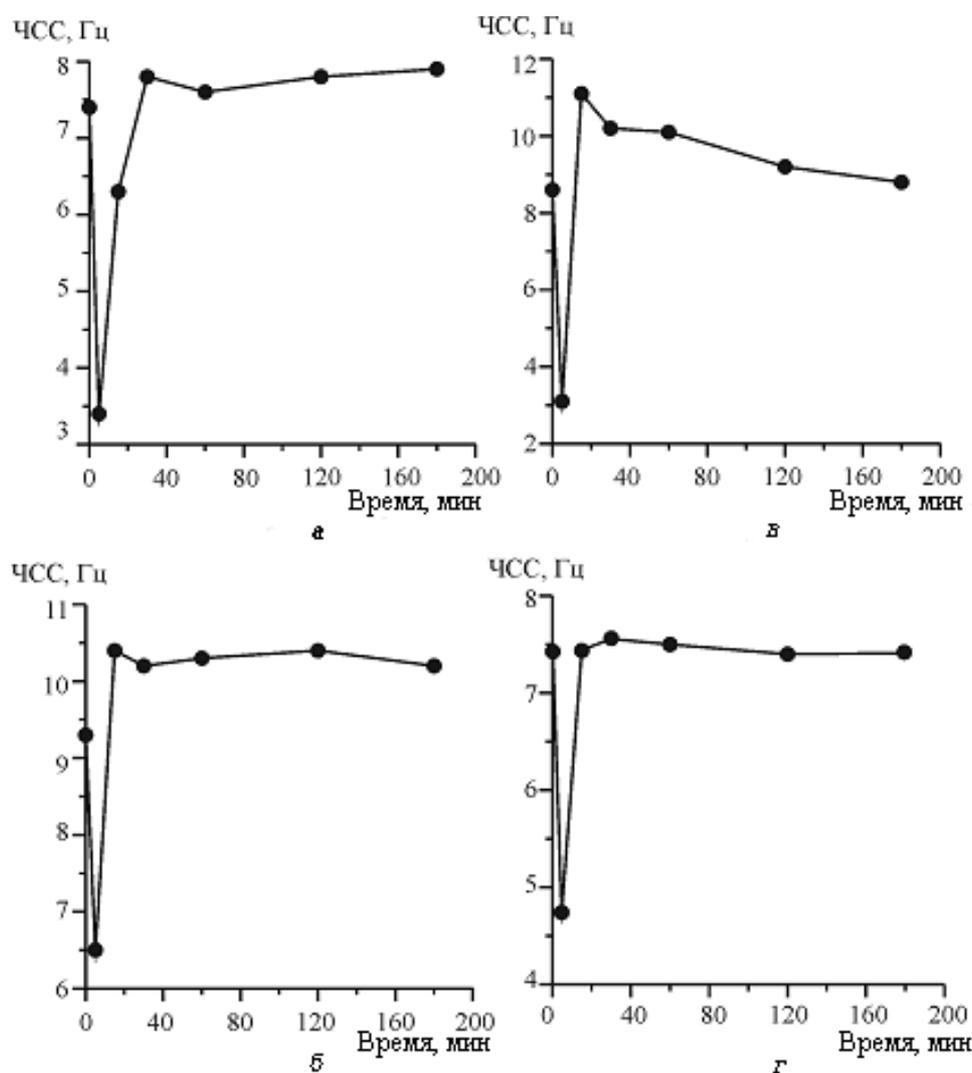


Рис. 2. Зависимость ЧСС дафнии от времени после воздействия фенола концентрацией 50 мг/л и различных потенций гомеопатических препаратов: *а* – Digitalis С6, *б* – Digitalis С30, *в* – Digitalis С1000, *г* – фенол, потенцированный С6

Таким образом, сердце дафнии можно рассматривать как экспериментальную модель для изучения особенностей действия гомеопатических препаратов.

1.3. Воздействие средне- и низкочастотных полей на микроорганизмы

У микроорганизмов, помещенных в электромагнитное поле, изучались поведение, рост и размножение, метаболизм, вирулентность, наследственность. В постоянном магнитном поле 400 А/м наблюдался эффект ориентации вольвокса [65].

Ряд морских и пресноводных микроорганизмов обладают четко выраженным магнитотаксисом. В настоящее время установлено, что в его основе лежит наличие у некоторых из них биогенного магнита, позволяющего ориентироваться в геомагнитном поле [69, 70–72, 74–76].

Переменные магнитные поля 50 Гц, 8–16 кА/м изменяли среднее время генерации кишечной палочки (*E.coli*) на 4–6 %. Менее выраженные разнонаправленные отклонения наблюдались в переменном магнитном поле 0,4–4 кА/м [77]. Импульсное пилообразное магнитное поле частотой 25 имп/с, 1,6 кА/м увеличивало число колоний шигеллы Флекснера на 26–60 %. Выраженность эффекта существенно зависела от направления магнитного поля относительно горизонтальной составляющей геомагнитного поля. Постоянное магнитное поле 4 и 36 кА/м замедляло, 8 кА/м – ускоряло, а 12, 16, 24 и 80 кА/м – не влияло на скорость роста шигелл. Переменное магнитное поле 100 Гц, 0,8 и 4 кА/м замедляло, 8 и 12 кА/м – ускоряло рост тех же микроорганизмов. При 16 кА/м наблюдалась гибель клеток при 2-часовой экспозиции. Разнонаправленное изменение скорости роста различных микроорганизмов отмечалось при действии постоянного магнитного поля 1,2–2560 кА/м и переменного магнитного поля 4–18 кА/м [54, 78, 70]. В других исследованиях изменения скорости роста микроорганизмов при действии постоянного магнитного поля 9–1100 кА/м и переменного магнитного поля 18 кА/м не обнаружены [79].

2-часовое воздействие переменного электрического поля 150 кВ/м, 50 Гц на культуру эшерихий привело к стимуляции клеточного деления [9]. В полях 0,1–0,7 В/м и 1 кА/м при частотах 0,1 – 1 Гц наблюдалась стимуляция каталазной активности у ряда микроорганизмов [30]. Подавление кислородного метаболизма на 30% у дрожжей отмечалось при действии переменного магнитного поля 0,4 А/м, 10–100 Гц [80]. Значительные изменения биохимической активности при действии постоянного магнитного поля 160 А/м–1800 кА/м у различных микроорганизмов обнаружены многими авторами [40, 70].

Таким образом, на рост и развитие микроорганизмов влияли переменные магнитные поля различной амплитуды из диапазона 0,0008–0,16 А/м и переменные электрические поля из диапазона 0,1–0,7 В/м частотой 0,01–8 Гц. Эффект существенно зависел от амплитудно-частотных параметров поля, вида, геомагнитной обстановки [22, 29, 30, 81, 82].

Действие электромагнитных полей на микроорганизмы существенно меняет их вирулентность. Отмечено как ее снижение [70], так и увеличение [34]. Проводились также эксперименты по изучению чувствительности микроорганизмов к физическим факторам на фоне действия электромаг-

нитных полей. Отмечено, что терморезистентность большинства культур в электромагнитных полях возрастает [83], а чувствительность их к действию витальных красителей увеличивается [84]. Выявлялись разнонаправленные изменения чувствительности патогенных микроорганизмов к антибиотикам. В одних случаях поля повышают устойчивость микробов, в других – снижают, в третьих – или не меняют, или вызывают разнонаправленные изменения [70]. Воздействие электромагнитного поля изменяет также антагонистические взаимоотношения между микроорганизмами и их фагопродукцию [10, 20, 29, 70, 78, 85, 86].

В некоторых работах изучалось влияние магнитного поля на процессы химического и радиационного мутагенеза. Отмечалось, что постоянное магнитное поле может увеличивать выход мутантов, уменьшать или вызывать разнонаправленные изменения [9, 70, 78].

Таким образом, подавляющее большинство исследований чувствительности различных микроорганизмов к слабым полям свидетельствует о неоднозначном воздействии этих полей и отсутствии общих закономерностей влияния действующих электромагнитных полей на микроорганизмы.

1.4. Воздействие средне- и низкочастотных электромагнитных полей на модели живых систем

Моделями живых систем можно считать объекты, обладающие отдельными, а лучше единичными свойствами, присущими истинной биосистеме. Соответственно этому к числу моделей живых систем относятся: неравновесные физико-химические реакции преимущественно коллоидного типа, ферментативные и иммунологические реакции, проводимые в пробирке, различные экстракты из тканей живых органов, изолированные ткани и органы целостного организма.

Большая серия исследований выполнена М. Барнотти [87] и его последователями с физико-химической реакцией оседания оксихлорида висмута в воде. Ими установлено, что эта реакция в строго контролируемых условиях идет нестабильно, ход ее в существенной степени зависит от внешней электромагнитной обстановки, различных гео- и гелиофизических процессов [87]. Оптическая плотность раствора билирубина снижается на 30–60% при действии знакопеременного магнитного поля 36 А/м [52]. Геомагнитное поле влияет на ориентацию растущих кристаллов эпсомита [9], на ход цветной реакции триптофана [54]. Переменное магнитное поле 0,5 Гц, 160 А/м увеличивает полимеризацию акрилнитрита [78, 41], а переменное магнитное поле 0,5–5–15–32 Гц, 40 А/м изменяет скорость окисления унитиола [88]. В переменном магнитном поле 0,001–300 Гц, 0,2–400 А/м изменяется ход автоколебательной реакции Белоусова-Жаботинского, если она ведется в условиях, близких к срыву колебаний [55, 82]. Если же автоколебания устойчивы, переменное магнитное поле тех же параметров на реакцию не действует [48]. Электропроводность крахмальных и агаровых гелей снижается при застывании в постоянном магнитном поле 560 А/м [54].

В постоянном магнитном поле 80 кА/м вероятность образования холестерической фазы в растворе холестерилкапроната повышается на 70%, а в импульсном магнитном поле 0,25 Гц, 640 кА/м – понижается на 60% [18].

После открытия химической поляризации ядер и электронов, разработки теории магнитных спиновых эффектов [1, 89] появилась серия работ, авторы которых пытались проследить весь путь от первичного эффекта действия постоянного магнитного поля на элементы живых систем до биологического феномена на основе этой теории. Значительная часть таких работ связана с изучением влияния постоянного магнитного поля на процессы фотосинтеза. Установлено, что постоянное магнитное поле 0,8–24 кА/м изменяет ход фотосинтеза высших растений, фотосинтезирующих бактерий на 1–20 % [48]. Разложение перекиси водорода катализой идет быстрее на 25 % при действии постоянного магнитного поля 8–80 кА/м [148], 500 кА/м [41, 90]. Однако другими авторами установлено, что постоянное магнитное поле до 520 кА/м не влияет на ход этой реакции [48, 91, 92]. Таким образом, даже на сравнительно элементарной реакции с хорошо известными радикальными механизмами эффекты действия постоянного магнитного поля неоднозначны.

Значительная часть модельных исследований проведена с ферментами. Знакопеременное 0,5 Гц и синусоидальное 50 Гц магнитное поле 36 А/м вызывает снижение активности АТФ-азы на 35–40% [6]. Постоянное магнитное поле 64–800 кА/м не изменяет ее активность [48]. Разнонаправленные изменения активности различных ферментов обнаружены в постоянном магнитном поле 10–1360 кА/м [6, 93]. Однако в постоянном магнитном поле 1120–8000 кА/м ход гидролиза сывороточного альбумина и метаглобулина не изменяется [48].

Значительно больше работ опубликовано по действию электромагнитного поля на изолированные ткани и органы. Переменное электрическое поле 1, 16, 31 75 Гц напряженностью 5, 10, 56, 100 В/м уменьшает выход кальция из мозговой ткани цыпленка и кролика. Максимальные отклонения от контроля наблюдались при 6 и 16 Гц, 10 и 56 В/м. Величина эффекта этой и ряда других реакций сложным образом зависела от амплитудно-частотных характеристик [94–96]. Разнонаправленные изменения активности ряда биохимических показателей гомогенатов отдельных тканей крыс отмечались при действии переменного магнитного поля 0,5 и 50 Гц, 36 А/м [6, 22, 40]. Аналогичные данные в полях более высокой напряженности получены многими авторами [6, 17, 40, 41, 42, 48].

Особенно часто в качестве изолированной ткани организма используется кровь. Знакопеременное и переменное магнитное поле 0,5 и 50 Гц, 8–270 А/м, действовавшее на растворы гемоглобина, сыворотку крови, взвесь эритроцитов, увеличивало скорость образования метагемоглобина, гемолиз эритроцитов, увеличивало или уменьшало СОЭ [22].

Изменение большого числа характеристик бычьей крови зарегистрировано при действии переменного магнитного поля 80 А/м – 4280 кА/м с градиентом от 0 до 12 кА/м² [48]. Импульсное электрическое поле

3860 кВ/м, 100 имп/с при длительности импульса 50 мс снижало вязкость крови на 30% после 8 мин воздействия [57]. Импульсное магнитное поле 2500 кА/м, 5–100 имп/с вначале увеличивало вязкость эритроцитов на 7–40 %, затем через 20–30 мин вязкость уменьшалась, а при частоте более 25 имп/с наблюдается гемолиз эритроцитов [41].

Переменное электрическое поле 50 Гц, 50–150 кВ/м вызывало разнообразные изменения в клеточной культуре фибробластов человека. Особенно сильно изменялся митотический индекс, достигая величин 100 % от уровня контроля. Авторы связывали полученные эффекты с влиянием поля на ход обменных процессов [97, 98]. В постоянном магнитном поле 4–1280 кА/м наблюдались многообразные разнонаправленные изменения клеточных культур различных штаммов микроорганизмов, как правило, нормализующиеся при длительном воздействии или в период последствия [10, 79, 157]. Аналогичные изменения наблюдались и при действии переменного магнитного поля 50 Гц, и 1–20 кА/м [9], импульсного магнитного поля 160 кА/м [100]. Отмечалось также, что на опухолевые клетки постоянное магнитное поле 160 и 640 кА/м действует значительно сильнее, тормозя их рост [11].

Автор [101] обращал внимание на важную роль воды в биологических процессах. В [101] приведено описание изменений физико-химических свойств воды в результате ее магнитной обработки. Автор [101] сделал вывод о том, что омагниченные водные растворы приобретают новые биологические свойства, причем эти свойства обнаруживаются даже при магнитной обработке, проведенной при случайных, недостаточно подобранных режимах. Так, например в [102], приведены данные об изменении лечебных свойств раствора адреналина. Автор [101] утверждает, что есть четкие сведения о влиянии магнитной обработки растворов на повышение проницаемости и биологических мембран. В [103] отмечалось изменение двигательной активности инфузорий в омагниченной воде.

Действие сверхмалых доз различных веществ на биологические объекты является в настоящее время активно разрабатываемой проблемой. Этим вопросам посвящен ряд обзоров, [104–108] освещающих экспериментальные данные по воздействию сверхмалых доз различных химических препаратов на функциональное состояние отдельных органов, систем и даже ферментов. Однако механизм действия, приводящий к появлению наблюдаемых результатов, остается неясным.

Большим шагом вперед в изучении механизма действия гомеопатических препаратов стало проведение экспериментальных исследований на различных биологических моделях – на интактных организмах, клеточных культурах, бесклеточных системах [109]. Однако воспроизводимость подобных опытов, в силу разных причин, остается неудовлетворительной, что определяет актуальность поиска новых экспериментальных моделей для изучения механизма действия гомеопатических препаратов.

В работах [110, 111] говорится о влиянии слабых магнитных полей на живые системы и высказывается мнение о том, что магнитное поле дейст-

вует на воду живых объектов, которые представляют собой своеобразные водные системы. В работе [112] описано влияние магнитной обработки воды на кинетику химических реакций. Есть сведения также о влиянии магнитной обработки воды на ее вязкость, которые, впрочем, носят разноречивый характер [113, 114]. Отмечается также уменьшение действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости воды в результате ее магнитной обработки [115]. Однако прямых подтверждений этой гипотезы не было. Ясно, что все эти факторы могут существенным образом изменять состояние биологических объектов.

1.5. Воздействие электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот на биологические объекты. Специфика терагерцового диапазона частот

В 1902 г. П.Н. Лебедев в докладе «Шкала электромагнитных волн в эфире» отмечал, что терагерцовый диапазон, соответствующий «молекулярным колебаниям материи», при освоении встретит существенные трудности. Терагерцовый диапазон – это последнее «белое пятно» на шкале электромагнитных волн.

Терагерцовый диапазон частот занимает самую широкую часть электромагнитного частотного спектра. Он лежит в диапазоне от сотен гигагерц до сотен терагерц (соответственно с длинами волн от 3 мм до 30 мкм) и включает в себя область КВЧ- и ИК- диапазонов [116,117].

При рассмотрении спектрально-молекулярных взаимодействий вещества и электромагнитного поля важно отметить, что максимальная энергия кванта $h\nu$ в КВЧ-диапазоне составляет $1,17 \cdot 10^{-3}$ эВ, а в терагерцовом она на два порядка больше, т.е. примерно 10^{-1} эВ. Ниже энергии кванта в КВЧ-диапазоне оказываются: энергия вращения молекул вокруг связей ($10^{-4} \dots 10^{-3}$ эВ), энергия куперовских пар при сверхпроводимости ($10^{-6} \dots 10^{-4}$ эВ) и энергия магнитного упорядочения ($10^{-8} \dots 10^{-4}$ эВ) [118]. В табл. 1 и на рис. 3 приводятся молекулярные ТГц-спектры излучения и поглощения газов атмосферного воздуха, метаболитов, а также некоторых газов, ухудшающих экологическую обстановку [119,120]. В табл. 1 приведены диапазоны частот, в которых расположены линии спектров основных атмосферных газов (N_2 , O_2 , CO_2 , пары H_2O) и газов, принимающих участие в метаболических процессах в живых объектах, включая дыхание (O_2 , CO_2 , H_2O , NO и др.); а также некоторых газов (N_2O , CO , H_2S , SO_2 и др.), анализируемых при экологическом контроле атмосферного воздуха и абсорбционной спектроскопии выхлопных газов.

В [121] приведена электродинамическая модель взаимодействия электромагнитных волн с атмосферным воздухом в дыхательной системе, показано, что при молекулярном возбуждении атмосферного воздуха в

ТГц-диапазоне частот может на порядок повыситься эффективность лечебных процедур в случае применения аэротерапии [122].

Таблица 1. Молекулярные терагерцовые спектры излучения и поглощения газов атмосферного воздуха, в том числе метаболитов некоторых загрязнителей воздуха

Молекула	Диапазон частот линий спектра, ТГц	Число линий
Азот (N ₂)	0,34...2,4	17
Оксид азота (NO)	0,1...0,5	15
Оксид азота (N ₂ O)	0,102...1,021	10
Кислород (O ₂)	0,5...1,55	10
Диоксид углерода (CO ₂)	0,364;0,544;1,27	3
Оксид углерода (CO)	0,347...2,315	17
Пары воды (H ₂ O) (с учетом димеров)	0,4...1,475*	5
Гидроксил (OH)	1,13...3,39*	3
Сероводород (H ₂ S)+воздух: концентрация сероводорода 90%	0,29...0,31*	1
концентрация сероводорода 60%	0,165...0,17*	1
Диоксид серы (SO ₂) (максимум поглощения)	0,29	1

* – линии поглощения в составе атмосферного воздуха.

Как видно из табл. 1, частотные диапазоны спектров ряда газов находятся между коротковолновой частью КВЧ-диапазона и длинноволновой ТГц-диапазона. В последнем случае наибольшее влияние на поглощение электромагнитных волн оказывает водяной пар, имеющий около 900 интенсивных линий поглощения.

Известно, что вода является сильным поглотителем коротковолнового ЭМИ, причем поглощение растет с увеличением частоты. Так, например, поглощение ММ-волн плоским слоем воды толщиной в 1 мм при длине волны $\lambda=8$ мм составляет 20 дБ, а при $\lambda=2$ мм – 40 дБ; при изменении частоты от 30 до 150 ТГц поглощение увеличивается на 20 дБ, а в диапазоне от 0,1 ТГц (100 ГГц) до 0,5 ТГц (500 ГГц) – почти на 40 дБ. В [123] сообщается, что на кривой частотной зависимости ослабления плоского водного капилляра в диапазоне 0,4–0,5 ТГц ослабление составляет 10–15 дБ, что позволяет говорить о так называемых окнах «прозрачности». Наличие подобных окон актуализирует исследования взаимодействия ЭМИ на этих частотах с биологическими объектами в их водной среде. В настоящее

время выявлены лишь некоторые резонансные частоты биологических объектов из области терагерцового диапазона (табл. 2).

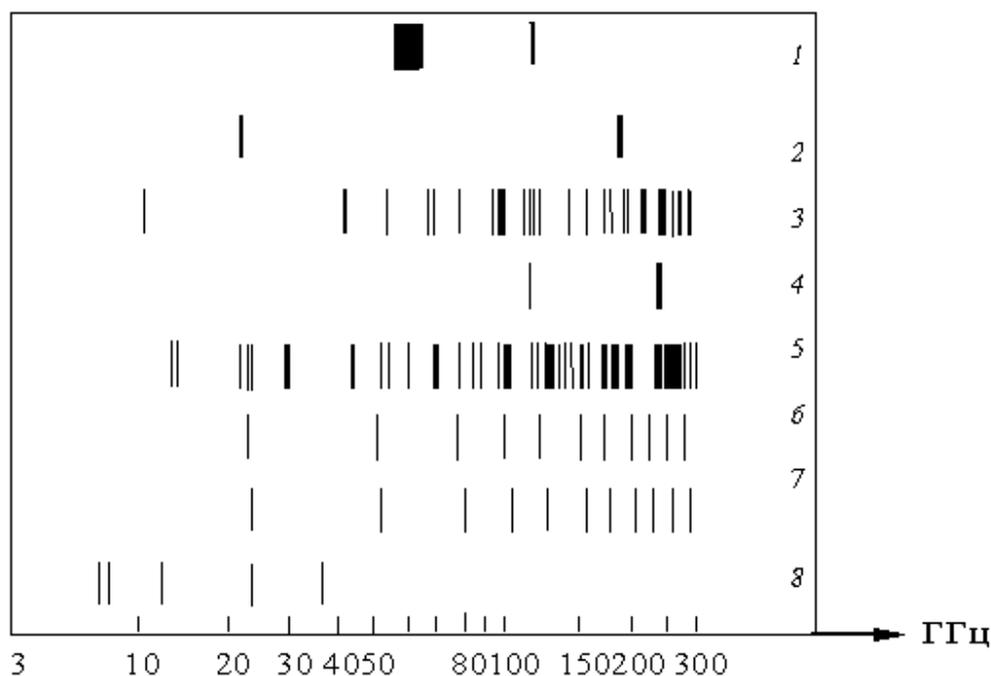


Рис.3. Линии поглощения атмосферных газов: 1 – кислород (O_2); 2 – пары воды (H_2O); 3 – озон (O_3); 4 – углекислый газ (CO_2); 5 – сернистый газ (SO_2); 6 – окись азота (NO); 7 – двуокись азота (N_2O); 8 – гидроксил (OH)

Таблица 2. Терагерцовые спектры частот, связанные с биологическими структурами

Биологические структуры	Структуры излучения и поглощения	Данные
Мембраны нативных клеток	0,1..1 ТГц	Расчетные
Хромосомы различной генной активности	0,75..15 ТГц	Расчетные
Дыхательная система (гортань, трахеи, бронхиолы), альвеолы легких	0,06...0,6 ТГц	Измеренные
	0,6...3 ТГц	Расчетные
	0,3...0,5 ТГц	Расчетные
Эритроциты крови	0,5...1 ТГц	Расчетные
Вода, пары воды	0,065...0,5 ТГц	Измеренные
	900 линий	Измеренные и расчетные

Говоря об особенностях терагерцового диапазона частот, необходимо отметить, что именно в этом диапазоне находится значительная часть реликтового ЭМИ, открытого в середине 60-х гг. прошлого века с помощью мощных радиотелескопов (табл. 3).

Таблица 3. Диапазон реликтового излучения

Наименование	Спектры излучения, ТГц	Данные
Реликтовый фон	0,1...0,3 0,3..10	Измеренные Расчетные

Освоение нового частотного диапазона всегда основывается на успехах в трех технических направлениях: разработке генераторов электромагнитных колебаний, устройств детектирования и приема ЭМИ, а также создании волноведущих электродинамических структур. Технические трудности освоения терагерцового направления обусловлены его расположением на шкале электромагнитных волн. С одной стороны, он находится между хорошо и давно освоенными оптическим и классическим СВЧ-диапазонами. С другой стороны, из-за малости длин волн этого излучения возникают практически непреодолимые трудности использования технических приемов, физических идей и, в частности, метода масштабного моделирования, использующихся в соседнем СВЧ-диапазоне. Например, характерные размеры для поперечного сечения прямоугольных или круглых волноводов для пространства взаимодействия в генераторных или усилительных приборах должны быть порядка сотен и даже десятков микрон. При сравнении с другим соседним (оптическим) диапазоном новые трудности возникают, напротив, уже из-за того, что длины волн в ТГц-диапазоне могут быть значительно больше длин волн оптического диапазона. Таким образом, освоение ТГц-диапазона потребовало не только определенного искусства использования достижений соседних СВЧ- и оптического диапазонов, но и применения новых физических идей и новых технических приемов конструирования различных элементов и устройств.

Основным методом продвижения СВЧ-приборов в более коротковолновые диапазоны в течение многих лет было масштабное линейное моделирование. Если при создании нового генератора, рабочая частота которого смещена по отношению к модели, все важные с точки зрения электродинамики и электроники размеры изменить прямо пропорционально длине волны, применяемые значения магнитного поля изменить обратно пропорционально длине волны, а рабочие напряжения сохранить неизменными, то токи нового прибора и его параметры окажутся такими же, как у модели, а плотности токов изменятся пропорционально квадрату рабочей частоты. Оказалось, что такому модельному освоению ТГц-диапазона мешают следующие факторы:

- 1) ужесточения допусков на размеры, связанные с необходимостью уменьшения геометрических размеров и расстояний. Если в сантиметровом диапазоне высокочастотный зазор резонаторов и шаг замедляющих систем составляет $\sim 0,5$ мм, то в субмиллиметровом диапазоне он должен уменьшиться до 5 мкм, а допуски $\approx 1\%$ от номинального значения – до сотых долей микрометра;

- 2) возрастание омических высокочастотных потерь с укорочением длины волны и увеличение влияния на потери качества обработки поверхности резонаторов и замедляющих систем;
- 3) возрастание плотности тока в электронных пучках по законам моделирования до 10^4 А/см² и более, трудности отвода тепла при уменьшении геометрических размеров нагреваемых элементов;
- 4) рост необходимого для фокусировки электронного пучка магнитного поля, который приводит к необходимости применения очень сильных магнитов ($H \geq 10$ кЭ).

Первоначально в ТГц-диапазоне использовались примитивные и мало мощные источники излучений – генераторы гармоник и ртутные лампы [124,125]. В конце 60-х гг. прошлого столетия в результате переноса принципов генерирования из СВЧ- и оптических диапазонов были разработаны генераторы когерентных излучений – магнетроны, оротроны (генераторы дифракционных излучений). Большой успех в основании миллиметрового и терагерцового (субмиллиметрового) диапазонов был связан с разработкой и серийным производством широкополосных ламп обратной волны (ЛОВ) с магнитной фокусировкой [124] (рис. 4).

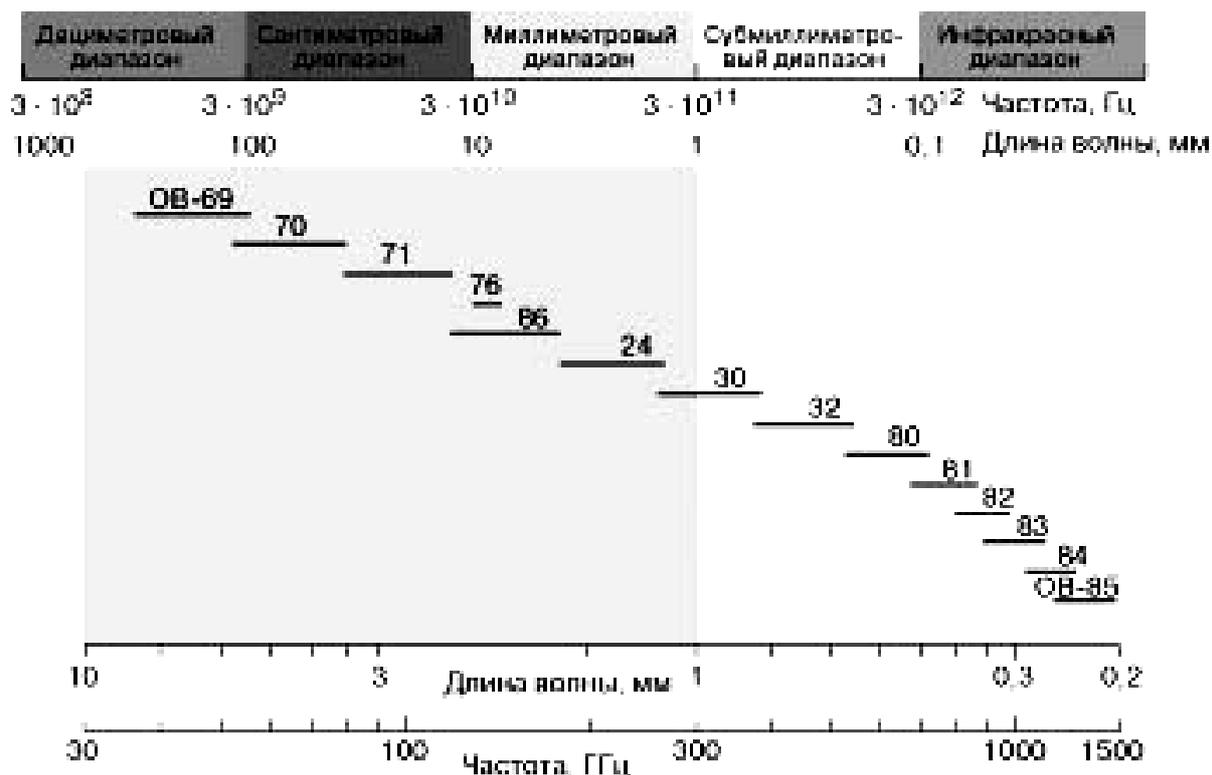


Рис. 4. Перекрытие терагерцового диапазона серией разработанных ЛОВ

К настоящему времени с помощью этих электровакуумных приборов полностью перекрыт весь ММ-диапазон и значительная часть ТГц- (субмиллиметрового) диапазона – вплоть до 1,3 ТГц.

Большим вкладом в освоение ТГц-диапазона явились достижения в разработке полупроводниковых приборов на основе кремния и арсенида галлия (лавинно-пролетные диоды, диоды Ганна). Позднее использовали

принципы генерации, характерные для оптического диапазона, – были разработаны лазерные источники на основе применения квантовых переходов в молекулах газов H_2O , D_2O , CO_2 и др. В настоящее время эти идеи используются при освоении высокочастотной части ТГц - диапазона. Для этого разрабатываются, с использованием достижений в области нанотехнологий, генераторы на гетероструктурах.

Находят применение также устройства в виде двухлазерных систем, в которых разность частот соответствует какой-либо частоте в ТГц-диапазоне. К числу классических физических способов генерации можно отнести получение ТГц-излучения с помощью ускоренного движения заряженных частиц с переменной скоростью (ускорением). В рассматриваемом случае для этих целей используются ускорители заряженных частиц. В одном из вариантов технического устройства поток электронов разгоняется до больших скоростей в линейном электронном ускорителе, при ускоряющем напряжении порядка 10 МэВ, а затем пропускается через сильное поперечное магнитное поле. Электроны начинают двигаться по спиральным траекториям вокруг магнитных силовых линий, при этом достигается ускорение порядка $a = 10^{17}$ м/с² и происходит излучение в ТГц-диапазоне (синхротронное излучение).

К числу экзотических можно отнести сверхмаломощные генераторы с использованием материалов, которые работают в условиях низкотемпературной сверхпроводимости. Принцип работы таких приборов основан на использовании нестационарного эффекта Джозефсона: изменяя напряжение, прикладываемое к «переходу» Джозефсона, можно изменять частоту генерации в соответствии с выражением $2 \cdot e \cdot U = \hbar \nu$, где \hbar – постоянная Планка, e – заряд электрона, U – напряжение, ν – частота генерации.

Большие значения мощности во всем ТГц-диапазоне как в непрерывном, так и в импульсном режимах, получены при использовании новых принципов генерации (лазеры на свободных электронах, релятивистские генераторы различных типов, гиротроны и дифракционные генераторы – оротроны и т.д.).

Как хорошо известно, в низкочастотной области ТГц-диапазона находится частота, при превышении которой тепловые шумы оказываются ниже квантовых шумов, определяющих пороговую чувствительность приемных устройств. В ТГц-диапазоне находят применение оптико-акустические приемники (ячейки Голея) и пироэлектрические детекторы с эквивалентной мощностью шума порядка 10^{-9} Вт при постоянной времени 1 с. В конце 70-х гг. прошлого столетия были предложены новые физические принципы построения приемных устройств на основе использования ряда полупроводниковых устройств (из сурьмянистого индия, арсенида галлия, фосфида индия и др.), работающих при температурах жидкого азота или гелия. Эти устройства имели пороговую чувствительность на 3–4 порядка более высокую, чем упомянутые выше неохлаждаемые устройства. Для детектирования электромагнитных колебаний в ТГц-диапазоне перспектив-

ным является использование сверхпроводящих структур, например джозефсоновских переходов, обладающих большой нелинейностью вольтамперных характеристик. В сверхчувствительных приемниках с использованием низкотемпературной сверхпроводимости в качестве гетеродинов находят применение генераторы Джозефсона [126].

В настоящее время при разработке датчиков в ТГц-диапазоне – теравизоров внимание исследователей привлечено к использованию в качестве видеодетекторов таких материалов, в которых наблюдается пьезоэлектрический механический резонанс. К ним можно отнести триглицинсульфат, танталат лития, ниобат бария и стронция.

Как уже указывалось выше, использование в ТГц-диапазоне волноводов в классическом исполнении оказывается невозможным по конструкторским и технологическим соображениям. В связи с этим для данного частотного диапазона были разработаны специальные волноведущие системы в виде диэлектрических, металлодиэлектрических, линзовых волноводов [127]. Однако следует отметить, что для исследований, связанных с воздействием ТГц-излучений на биологические объекты, к наиболее подходящей волноведущей системе, как показала практика, следует отнести квазиоптические волноводы.

Квазиоптическая линия передачи представляет собой полый диэлектрический лучевод с внутренним диаметром значительно большим длины волны [125,128]. Полый диэлектрический лучевод (ПДЛ) имеет существенные преимущества перед известными линиями передачи ввиду присущей ему совокупности положительных качеств: отсутствия периодичностей, относительно высокой степени подавления побочных типов волн, близкого к плоскому фазового фронта волны с минимальным затуханием. Такая линия передачи позволяет осуществлять построение самых разнообразных измерительных схем, в том числе предназначенных для диагностики газоразрядной плазмы, измерения параметров диэлектриков и полупроводников, контроля биологических сред, а также для использования в радиоастрономии и радиолокации.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что достоверные статистически значимые изменения биохимических процессов у биологических объектов обычно не превышают 30–40% от уровня контроля, редко достигая 60–80%, и сравнительно быстро возвращаются к норме. На направленность и выраженность реакций в большой степени влияют исходное состояние организма и режим воздействия. Однако явная зависимость величины изменений от напряженности действующего поля или частоты не прослеживается. Кроме того, авторы не обосновывают выбор параметров действующих полей и время, в течение которого они действуют, поэтому остается неясным, почему в экспериментах использовались те или иные частоты и амплитуды.

Результаты воздействия слабых, средних и высоких электрических и магнитных полей на ферменты, кровь, изолированные ткани и органы сви-

детельствуют об отсутствии универсального подхода в выборе объекта эксперимента и параметров действующих электромагнитных полей.

Было высказано предположение о том, что магнитное поле, действующее на воду и меняющее ее вязкость, проницаемость и т.п., может существенным образом изменять состояние биологических объектов, которые представляют собой своеобразные водные системы. Однако прямых подтверждений этой гипотезы не было.

Поскольку электромагнитные поля изменяют состояние большого числа параметров биологических объектов, то необходим выбор такого биологического объекта, у которого изменения физиологических параметров однозначно связано с параметрами внешнего воздействия. Известно применение в качестве биоиндикатора внешних воздействий на водную среду пресноводного рачка – дафнии.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СРЕДНЕ- И НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА БИООБЪЕКТЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ СРЕДЫ

Для оценки степени загрязнения окружающей среды широкое применение нашли методы, основанные на изучении физиологических параметров биологических тест-объектов. Наибольший интерес в качестве тест-объектов для контроля состояния водной среды представляет использование пресноводных рачков □ дафнии (*Daphnia magna* Straus), поскольку известна высокая чувствительность их физиологических параметров к концентрации токсических компонентов в водной среде [2, 129]. Авторы работы [2] показали сильную зависимость периода биений сердца дафнии от концентрации гидрохинона в водном растворе. В работе [129] установлено влияние концентрации фенола на частоту дыхания дафнии.

2.1. Лазерный автодинный датчик для тестирования биообъектов

Для тестирования динамического состояния биообъектов использовался датчик на основе эффекта автодинного детектирования в полупроводниковом лазере. В зависимости от коэффициента обратной связи полупроводниковый лазер может работать в нескольких режимах [3, 4]. Наилучшим режимом для измерения амплитуд вибраций объектов по отклику оптической автодинной системы является режим слабой обратной связи.

В основу метода регистрации динамического состояния тест-объектов положен принцип формирования сигнала внешнего автодетектирования при возвращении части отраженного от контролируемого объекта излучения в резонатор полупроводникового лазера [3, 4]. Для реализации метода использовалась установка, схема которой приведена на рис.5. Излучение полупроводникового лазера 7 (ИЛПН-206), стабилизированного источником тока 8, фокусировалось линзой 6 в область сердца дафнии 4, помещенной в канал 3 на прозрачном столике 5. Для визуализации инфракрасного излучения полупроводникового лазера и его фокусировки в область сердца использовался прибор ночного видения 1. Часть излучения, отраженного от сердца дафнии, возвращалась в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной мощности которого регистрировалось фотодетектором 9. Сигнал с фотодетектора поступал через усилитель 10 и аналого-цифровой преобразователь 11 в компьютер 12. После вычисления спектра продетектированного сигнала с помощью метода быстрого преобразования Фурье определялся период колебаний сердца дафнии.

Для контрольных измерений применялась вода, на которой дафнии культивировались. Одиночную дафнию из аквариумной культуры перемещали в камеру, содержащую токсичный раствор и ограничивающую движения рачка. Камеру фиксировали на предметном столике микроскопа. Оптическая система наводилась на сердце, а аппаратура настраивалась на максимальный сигнал.

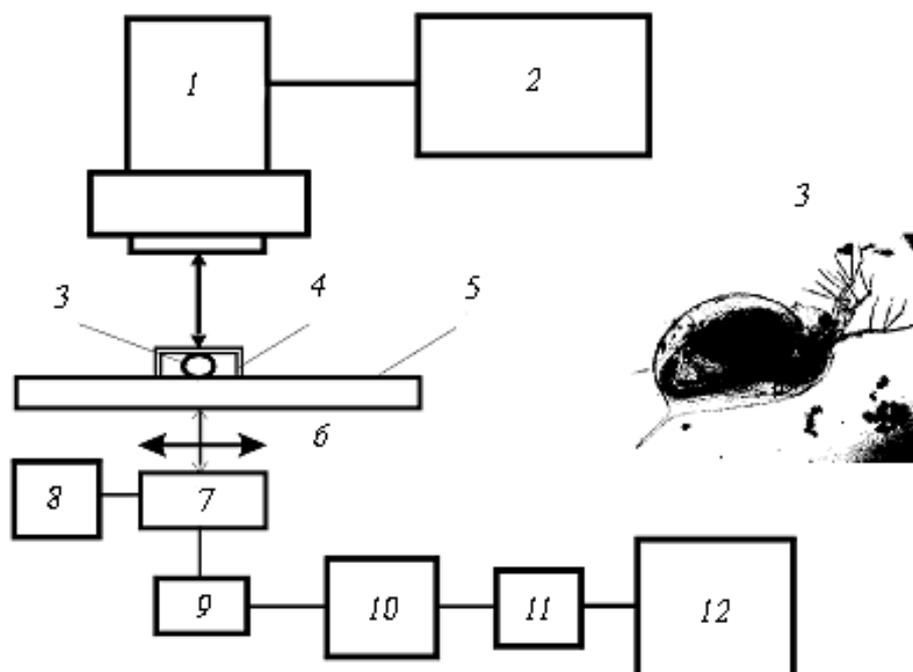


Рис.5. Схема экспериментальной установки для измерения частоты биений сердца дафнии

2.1.1. Измерения частоты и амплитуды биений сердца дафнии

Результаты измерений частоты биений сердца дафнии для различной концентрации фенола, растворенного в водной среде, приведены на рис.6. Как видно из рис.6, частота сердцебиения дафний в контрольных условиях изменяется незначительно и стабилизируется после адаптации.

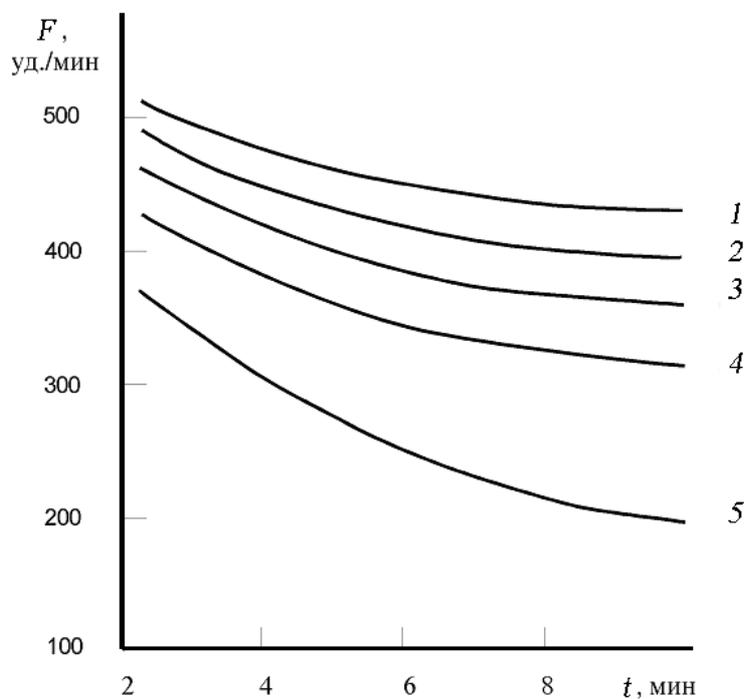


Рис.6. Зависимость частоты сердцебиения дафнии F от продолжительности воздействия водного раствора с фенолом различной концентрации: 1— контрольная партия; 2— 1,2 мг/л; 3— 2,5 мг/л; 4— 5 мг/л; 5— 10 мг/л

При концентрации фенола 0,3 мг/л динамика частоты сердцебиений сходна с контрольными измерениями. Наибольшее уменьшение частоты биений сердца дафнии наблюдалось для концентраций фенола 10 мг/л. При этом частота становилась равной ~ 200 ударов в конце периода экспозиции. Уменьшение частоты биений сердца дафнии регистрировалось для концентраций фенола, превышающих величину 1,2 мг/л. При этом промежуток времени, в течение которого наблюдается существенное уменьшение значения частоты биений сердца дафнии для концентраций фенола меньших 5 мг/л, не превышал 5 минут. Последнее обстоятельство позволяет рассматривать описанную методику в качестве средства, обеспечивающего проведение тест-контроля водной среды на наличие токсических компонентов [5–9].

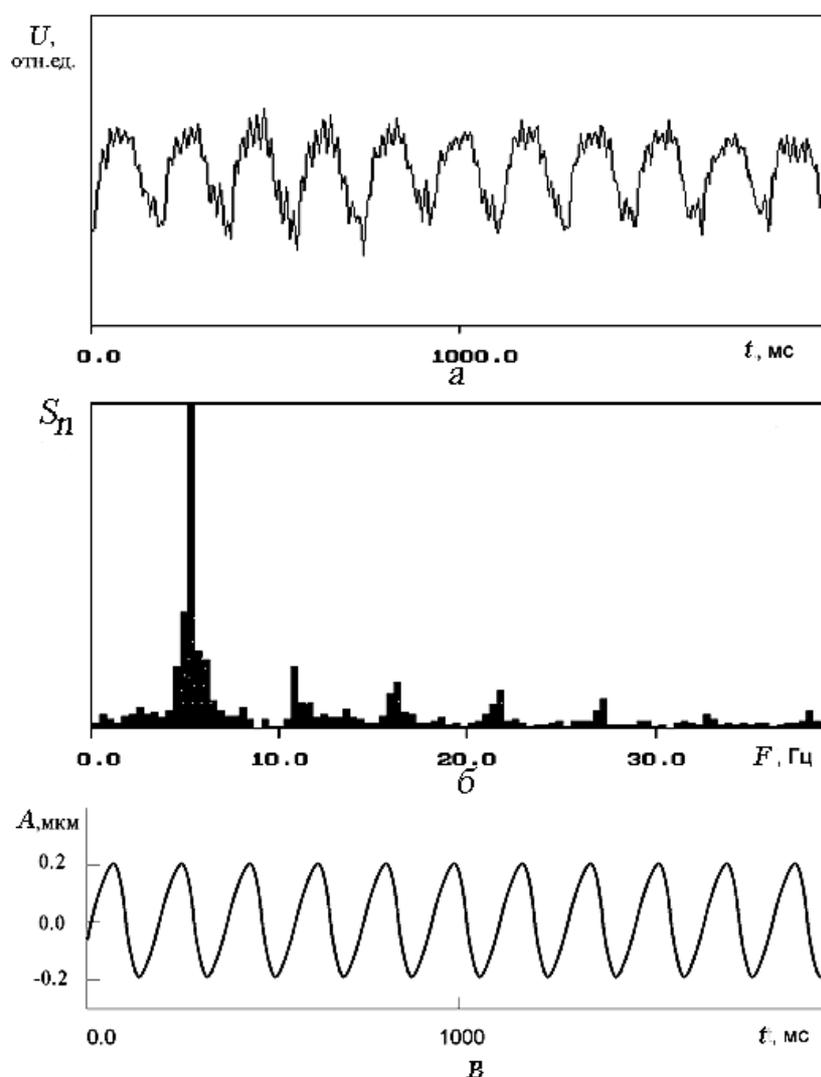


Рис.7. Результаты измерений и обработки автодинного сигнала при контроле биений сердца дафнии: *a* – зависимость мгновенных значений величины протектированного сигнала, *б* – рассчитанный спектр протектированного сигнала, *в* – рассчитанная зависимость мгновенных значений величины смещения сердца дафнии

Другими параметрами, которые могут быть зарегистрированы в схеме лазерной автодинной системы, является амплитуда и форма протектированного сигнала, по характеру которых также можно судить о степени токсичности водной среды. На рис.7, а приведена зависимость мгновенных значений величины протектированного сигнала от времени при наличии фенола в водной среде. На рис.7, б представлены результаты расчета спектра протектированного сигнала. Частота сердцебиения дафнии определяется основной частотой гармоники вычисленного спектра, а амплитуда колебаний \square по набору спектральных гармоник [10–14]. На рис.7, в приведена рассчитанная по результатам измерений зависимость мгновенных значений величины смещения сердца дафнии от времени при наличии фенола в водной среде.

Как следует из результатов проведенных исследований, при наличии фенола в водной среде амплитуда биений сердца дафнии составила 0.2 мкм, что существенно меньше амплитуды биений сердца дафнии в отсутствие фенола (0,35 мкм).

2.1.2. Эффект синхронизации внешним электрическим полем частоты сердцебиений дафнии

В радиоэлектронике хорошо известно и широко используется на практике явление синхронизации и затягивания частоты генератора внешним сигналом. Можно предположить, что подобный механизм влияния внешнего сигнала должен наблюдаться и для генераторов другой природы. Своего рода генератором (автоколебательной системой) можно считать сердце биообъектов. Наибольший интерес представляет изучение воздействия внешнего сигнала на биообъекты, которые используются как тестовые при экологических исследованиях.

Были проведены исследования влияния внешнего электрического поля на частоту и амплитуду биений сердца дафнии как в режиме частот, близких к частоте биений сердца, так и при значительном отклонении частоты внешнего воздействия от частоты нормального сердцебиения.

В эксперименте в качестве внешнего возмущающего воздействия использовалось переменное электрическое поле различной амплитуды и частоты. Влияние этого воздействия на работу сердца дафнии оценивалось по изменению амплитуды и частоты ее сердцебиений.

В результате экспериментов было установлено, что воздействие переменного электрического напряжения вызывает синхронизацию сердцебиений с частотой этого напряжения.

На рис.8, а приведены зависимости частоты $f_{\text{даф}}$ и амплитуды $A_{\text{даф}}$ биений сердца дафнии от частоты периодического воздействия при амплитуде внешнего напряжения $U=10\text{В}$. Как следует из результатов, представленных на рис.8, а, режим синхронизации наблюдается в диапазоне частот $3\div 10$ Гц внешнего напряжения, при котором частота сердцебиений в точности сов-

падает с увеличивающейся частотой внешнего сигнала. При $f_{\text{внеш}} > 11$ Гц режим синхронизации нарушается, частота и амплитуда биений сердца дафнии резко уменьшаются, а затем вновь начинают увеличиваться с ростом $f_{\text{внеш}}$. При уменьшении частоты внешнего сигнала зависимость $f_{\text{даф}}$ от $f_{\text{внеш}}$ до $f_{\text{внеш}}=7$ Гц шла по другой траектории, т.е. наблюдается своеобразный гистерезисный характер этой зависимости. Начиная с частоты 7 Гц частота биений сердца дафнии и частота внешнего воздействия вновь совпадали.

На рис.8, б приведены зависимости частоты и амплитуды биений сердца дафнии от амплитуды внешнего периодического воздействия.

При отсутствии внешнего воздействия амплитуда и частота сердцебиения дафнии в условиях эксперимента составляла соответственно 0,35 мкм и 3 Гц. Как следует из результатов, представленных на рис.8, б, воздействие внешнего переменного напряжения на частоту сердцебиений дафнии носило пороговый характер. При частоте внешнего сигнала 6 Гц увеличение напряжения от нуля до некоторого порогового значения $U=8$ В не приводило к заметному изменению частоты сердцебиения. Дальнейшее увеличение $U>8$ В вызывало быстрый рост частоты сердцебиения, вплоть до совпадения с частотой внешнего периодического сигнала при напряжении $U>16$ В, то есть наблюдался захват и синхронизация частоты сердцебиений дафнии с частотой внешнего переменного напряжения.

При уменьшении амплитуды внешнего воздействия режим синхронизации поддерживался и в диапазоне напряжений $12 \text{ В} < U < 16 \text{ В}$. Зависимость $f_{\text{даф}}$ от $U_{\text{внеш}}$ также носила гистерезисный характер.

Несколько иной характер зависимости частоты биений сердца дафнии наблюдался при воздействии на нее внешним сигналом на частоте 50 Гц. С ростом амплитуды напряжения от 0 до 16 В наблюдалось увеличение частоты сердцебиений дафнии, однако синхронизации колебаний внешним переменным напряжением не наступало. В максимуме кривой $f_{\text{даф}}(U)$ величина $f_{\text{даф}}$ составляла 5 Гц. Дальнейшее увеличение амплитуды внешнего воздействия $U>16$ В приводило к уменьшению частоты биений сердца дафнии до значений, существенно меньших, чем при отсутствии внешнего напряжения. При уменьшении переменного напряжения от значений больших, чем 40 ÷ 48 В наблюдалось монотонное увеличение частоты сердцебиений от 1 до 3 Гц.

На зависимости амплитуды биений сердца дафнии от переменного напряжения наблюдается максимум при $U\approx 8$ В. Дальнейшее увеличение U приводило к монотонному уменьшению амплитуды биений сердца дафнии. Зависимость $U_{\text{даф}}$ от U также носила гистерезисный характер.

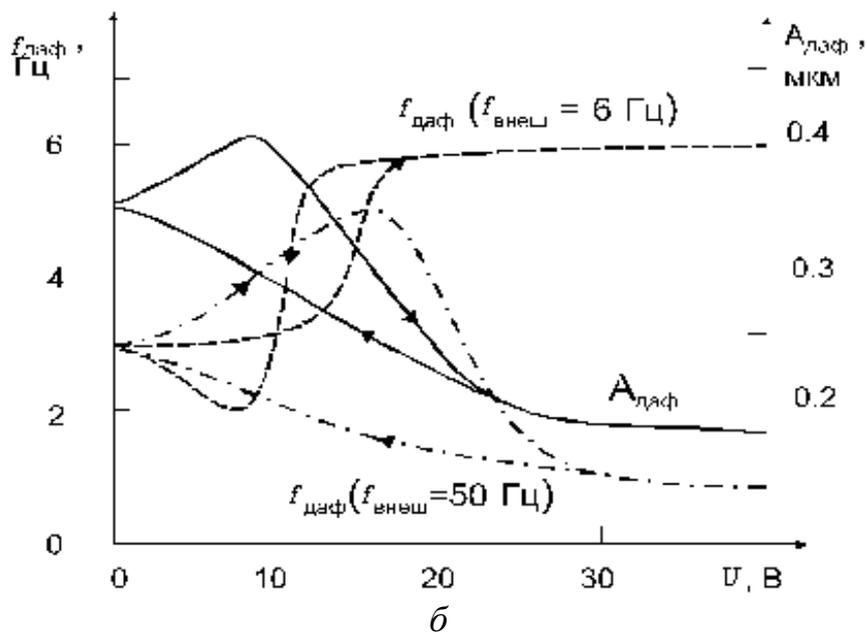
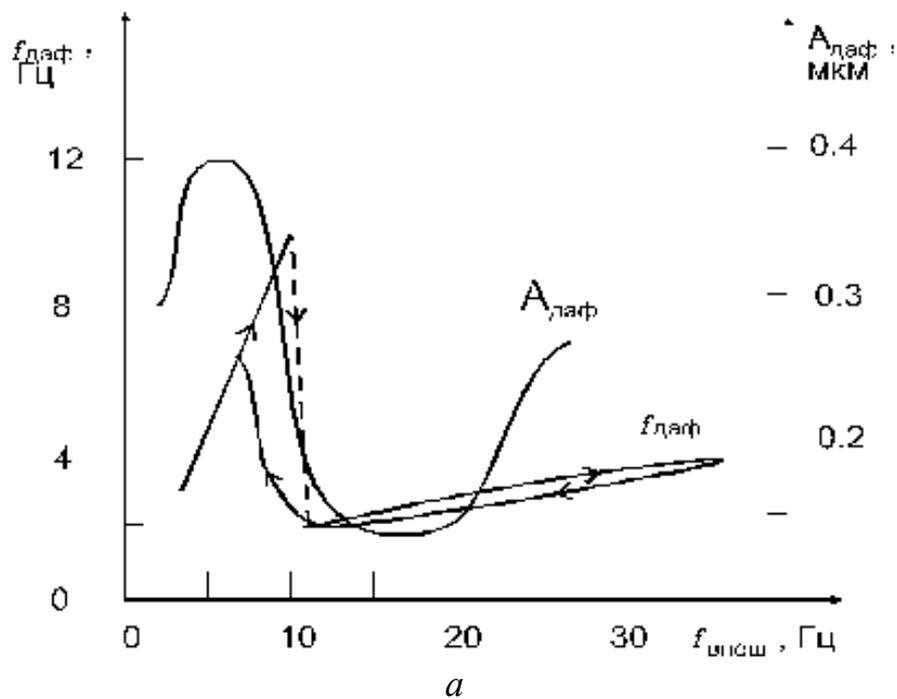


Рис.8. Зависимость частоты и амплитуды биений сердца дафнии при наличии внешнего периодического воздействия: *a* – от частоты внешнего периодического воздействия (стрелками указано направление изменения частоты воздействия); *б* – от амплитуды внешнего периодического воздействия (стрелками указано направление изменения амплитуды воздействия)

2.2. Воздействие переменного электрического поля на колебательные движения глаза дафнии

Известно, что в состоянии периодического колебательного движения находится не только сердце, но и глаз дафнии (рис. 9). Как отмечалось ранее, из теории колебаний и волн известно явление синхронизации колебательных систем, наблюдающееся при воздействии внешним сигналом с

частотой, близкой к собственной частоте колебательной системы или ее гармонических и субгармонических составляющих. Это явление хорошо изучено экспериментально для различного рода радиоэлектронных систем [130, 131].

В работах [132] показана возможность синхронизации внешним электрическим сигналом сердечного ритма дафнии и использование этого эффекта для контроля загрязнения водной среды.

Представляет интерес исследование возможности наблюдения эффекта синхронизации других органов биологических объектов, совершающих менее регулярные колебания. Такой колебательной системой является, например, орган зрения пресноводного рачка дафнии, представляющий собой сложный непарный глаз, расположенный в передней части головы и обладающий относительно значительными размерами (диаметр ~ 30 мкм) и подвижностью (рис. 10). Последнее обусловлено тем, что к глазу прикрепляются специальные глазные мышцы. Очевидно, такие колебания играют роль сканирования окружающей среды. В результате сокращения этих мышц глаз совершает ротаторные колебательные движения, обусловленные различной частотой сокращения глазных мышц. При нормальных условиях глаз дафнии совершает колебания в диапазоне частот 6–15 Гц, причем отдельные гармоники колебаний глаза совпадают с частотой ее сердцебиения.

Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой приведена на рис. 11.



Рис.9. Внешний вид пресноводного рачка *Daphnia magna* Straus

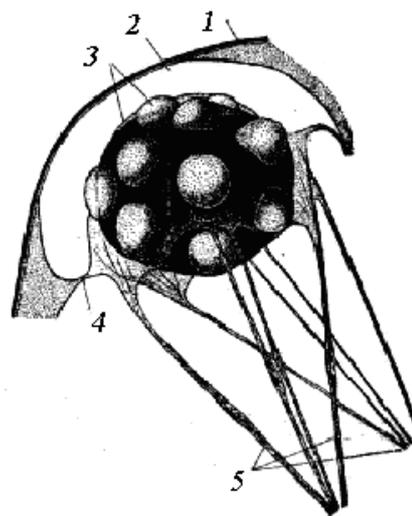


Рис. 10. Строение сложного непарного глаза: 1– хитиновая кутикула, 2– камера, окружающая глаз, 3 - хрустальные конусы омматидиев, 4 – лигаменты, на которых подвешен глаз, 5 – мышцы

Излучение источника света 1 фокусировалось линзой 2 в область глаза дафнии 3, помещенной в канал 4 на прозрачном столике 5. В стакан 6 заливалась водная среда обитания дафний, в которую опускались электроды 7, соединенные с источником напряжения U . Для фиксации момента захвата частоты колебаний глаза дафнии частотой внешнего электрического сигнала использовался микроскоп 8. Часть излучения, отраженного от светоделительной пластинки 13, направлялась на фотодетектор 9. Сигнал с фотодетектора поступал через усилитель 10 и аналого-цифровой преобразователь 11 в компьютер 12. После регистрации осциллограммы колебаний глаза дафнии вычислялся спектр протектированного сигнала с помощью метода быстрого преобразования Фурье.

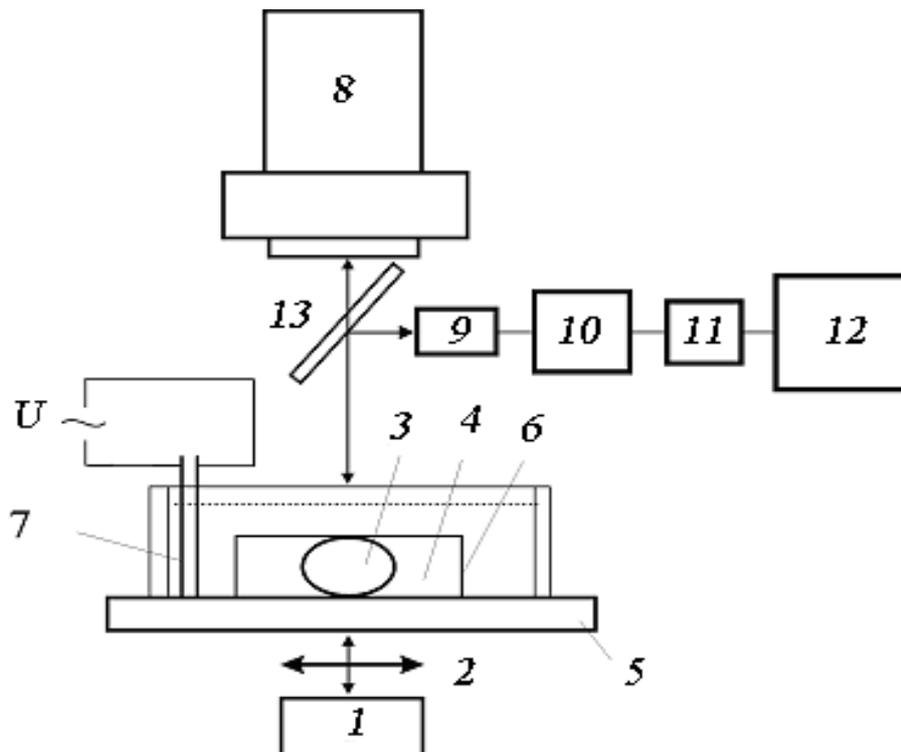


Рис.11. Схема установки для проведения измерений: 1 – источник света, 2 – линза, 3 – дафния, 4 – канал для фиксирования дафнии, 5 – прозрачный столик, 6 – стакан с водной средой обитания дафний, 7 – электроды, 8 – микроскоп, 13 – светоделительная пластинка, 9 – фотодетектор, 10 – усилитель, 11 – аналого-цифровой преобразователь, 12 – компьютер

При непериодическом характере движений объекта разложение функции движения можно представить в виде интеграла Фурье:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} c(\nu) \exp(i\nu t) d\nu, \quad (2.1)$$

где

$$c(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \exp(-i\nu\tau) d\tau.$$

Для периодического характера движений выражение (2.1) может быть представлено в виде

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t)], \quad (2.2)$$

$$\text{где } a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) \cos(k\omega_0 \tau) d\tau, \quad b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) \sin(k\omega_0 \tau) d\tau.$$

Пресноводные рачки дафнии (*Daphnia magna* Straus) культивировались в стандартных лабораторных условиях. В экспериментах использовали особей размерами 0,7 – 1,5 мм. Одиночную дафнию из аквариумной культуры перемещали в камеру, ограничивающую ее движения. Камеру фиксировали на предметном столике микроскопа.

В эксперименте использовалось переменное электрическое поле различной амплитуды и частоты. На рис. 12 приведены осциллограммы движений глаза дафнии и их спектры, полученные для случая собственных движений глаза (рис. 12, а) и при возникновении явления синхронизации (рис. 12, б). Как видно из рис. 12, а, в спектре сигнала выделяются гармоники с частотами 4,5, 9, 13 и 18 Гц, причем максимальной амплитудой обладает гармоника с частотой 13 Гц. Момент возникновения явления синхронизации проявлялся в том, что основная гармоника колебаний глаза дафнии захватывалась частотой внешнего электрического сигнала, причем остальные частотные составляющие движения глаза значительно подавлялись.

Возникновение явления синхронизации наблюдалось в диапазоне амплитуд воздействующего сигнала 5 - 7 В. Можно предположить, что существование порогового характера проявления эффекта синхронизации в зависимости от амплитуды воздействующего сигнала может быть связано с пороговой чувствительностью механической функции (движений глаза) к внешнему электрическому воздействию. Такой пороговой чувствительностью к внешнему электрическому воздействию обладают биологические мембраны [134]. Механизм преобразования электрического поля в механическую форму движений органов биологических объектов до настоящего времени не ясен.

При возникновении явления синхронизации, как видно из рис. 12, б, характер движения глаза становится близким к гармоническому (с частотой синхросигнала равной 8 Гц) с небольшой модуляционной составляющей, обусловленной, по-видимому, тремором.

Была измерена зависимость амплитуды колебаний глаза дафнии от частоты приложенного электрического поля при фиксированной амплитуде синхронизирующего сигнала. На рис. 13 приведены результаты измерений зависимости амплитуды колебаний глаза дафнии от частоты приложенного синхронизирующего электрического сигнала фиксированной амплитуды, равной 7В.

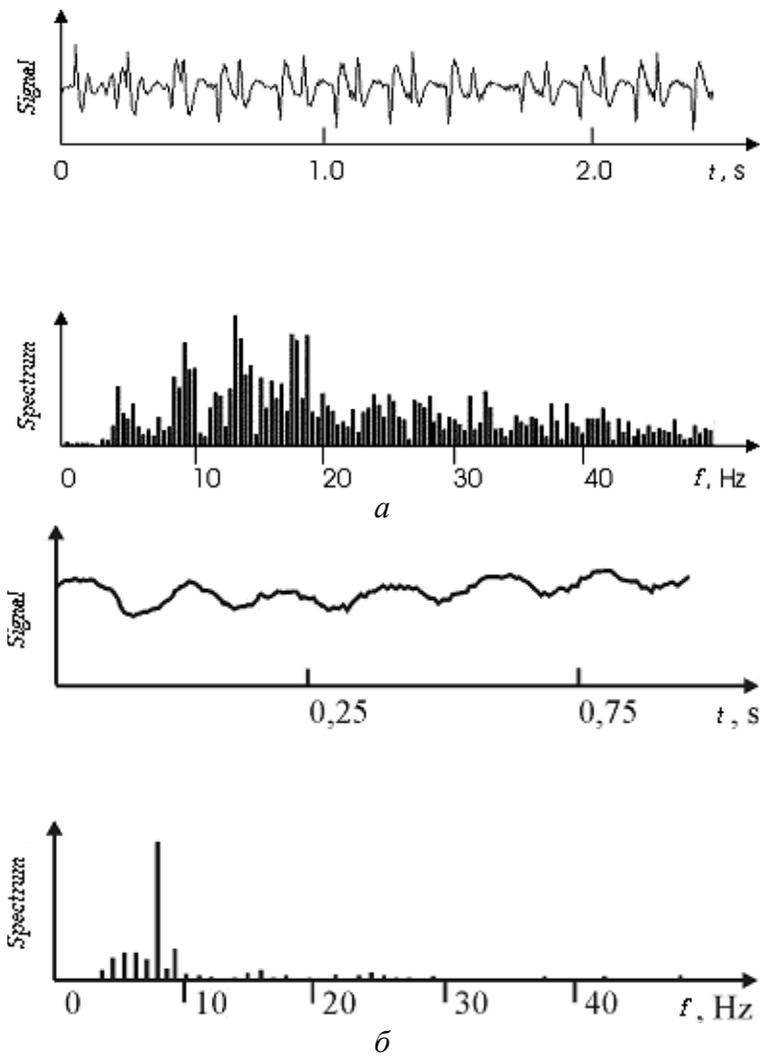


Рис. 12. Осциллограммы движений глаза дафнии и их спектры: *a* – для собственных движений глаза, *б* – при возникновении явления синхронизации

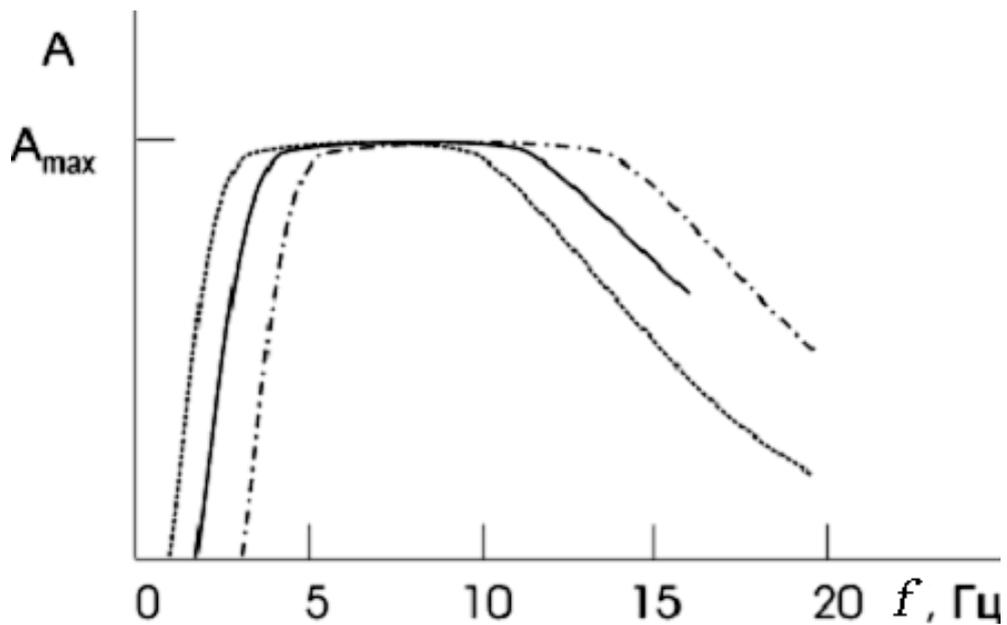


Рис.13. Зависимости амплитуды колебаний глаза дафнии от частоты приложенного синхронизирующего электрического сигнала фиксированной амплитуды равной 7В для трех особей (три типа линий)

Как следует из рис. 13, амплитуда колебаний глаза дафнии в режиме синхронизации имеет максимальное значение в диапазоне частот $\sim 4\text{--}15$ Гц. В диапазоне частот до ~ 2 Гц и выше 20 Гц наблюдался срыв режима синхронизации колебаний глаза. Была исследована также зависимость амплитуды переменного электрического напряжения, при котором наблюдался эффект синхронизации глаза дафнии, от состава водной среды, в которую дафния помещалась. Состав водной среды изменялся путем добавления фенола различной концентрации от 1 до 10 мг/л.

На рис. 14 приведена зависимость величины напряжения синхронизации частоты колебаний глаза дафнии от концентрации фенола в водной среде.

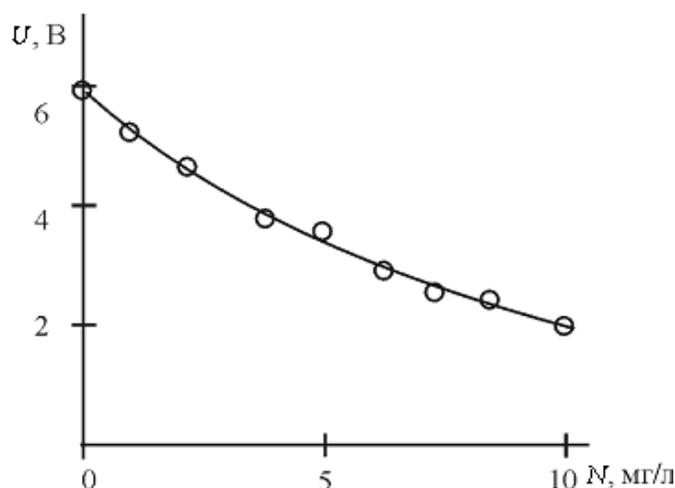


Рис.14. Зависимость величины приложенного напряжения, при котором возникало явление синхронизации частоты колебаний глаза дафнии, от концентрации фенола в водной среде

Как следует из результатов, приведенных на рис. 14, при увеличении концентрации фенола N уменьшалась величина напряжения U , при котором происходила синхронизация частоты колебаний глаза дафнии частотой внешнего сигнала. Обнаруженная закономерность уменьшения напряжения синхронизации может являться свидетельством ухудшения жизненных показателей дафний, подверженных воздействию растворенных в воде токсикантов.

2.3. Влияние внешнего переменного магнитного поля на частоту сердцебиений дафнии

В работе [122] приведены результаты исследований воздействия слабых низкочастотных магнитных полей на спектральный состав сигнала, характеризующий сердечный ритм дафнии. Частота воздействующего на дафнию переменного магнитного поля составляла 16 Гц. Авторами этой работы было установлено, что при воздействии такого сигнала средний период сердцебиений дафнии изменяется незначительно, в то время как в спектре сигнала, характеризующего сердечный ритм, появляются допол-

нительные частотные составляющие. В работе [132] показано, что вследствие проявления эффекта синхронизации и затягивания частоты при воздействии электрического поля с частотой, близкой к частоте сердцебиений дафнии, может наблюдаться сильное изменение ее сердечного ритма. Следовательно, можно предположить, что и воздействие магнитного поля с частотой, близкой к частоте сердцебиений дафнии, должно приводить к существенному изменению ее сердечного ритма.

Пресноводные рачки дафнии (*Daphnia magna* Straus) культивировались в стандартных лабораторных условиях. В экспериментах использовали особей размерами 0,7 – 1,5 мм. Одиночную дафнию из аквариумной культуры перемещали в камеру, ограничивающую ее движения. Камеру фиксировали на предметном столике микроскопа [136]. Схема установки приведена на рис. 15. Излучение источника света 1 фокусировалось линзой 2 в область сердца дафнии 3, помещенной в камеру 4 на прозрачном столике 5.

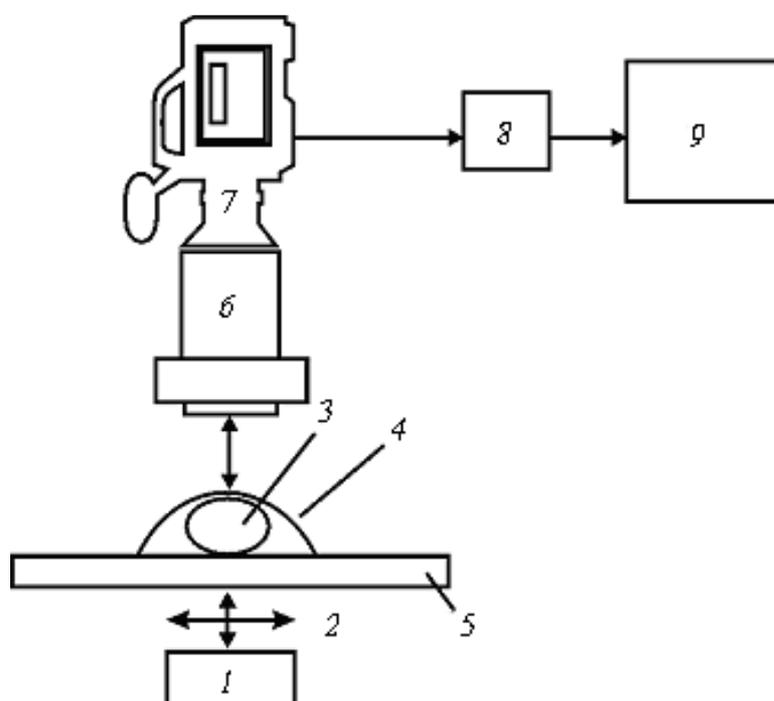


Рис. 15. Схема установки: 1 – источник света, 2 – линза, 3 – дафния, 4 – камера для дафнии, 5 – прозрачный столик, 6 – микроскоп, 7 – видеокамера, 8 – плата видеоввода, 9 – компьютер

Видеоизображение биений сердца дафнии вводится в компьютер 9 с помощью видеокамеры 7, платы видео ввода 8 и анализируется с помощью специально разработанной программы под названием "*heartbeating.exe*". Для ввода изображения используется плата видеоввода *Matrox Marvell G400*, поддерживающая полноформатный ввод видеоматериалов со скоростью 30 кадров в секунду, и поставляемое с ней программное обеспечение для захвата видеоизображения в файл формата *AVI*.

Программная часть системы включает специализированную программу *heartbeating.exe*, функционирующую в среде *Windows'98* и осуществляющую анализ введенного изображения. Программа *heartbeating.exe* по-

звolyет анализировать введенное в компьютер видеоизображение колеблющегося сердца дафнии: осуществляет открытие файла формата AVI.

На рис. 16 приведена схема анализа видеоизображения. Алгоритм определения частоты сердцебиений дафнии заключается в следующем.

После ввода данных в ЭВМ с источника видеоинформации (видеокамеры) и запуска программы *heartbeating.exe*, видеоизображение отображается в окне (см. рис.16). Программа осуществляет перебор кадров видеоизображения, при этом подсчитывается число полных периодов сердечных сокращений дафнии и вычисляется частота сердцебиений. Полученные результаты выводятся в специальном окне «Результаты измерений».

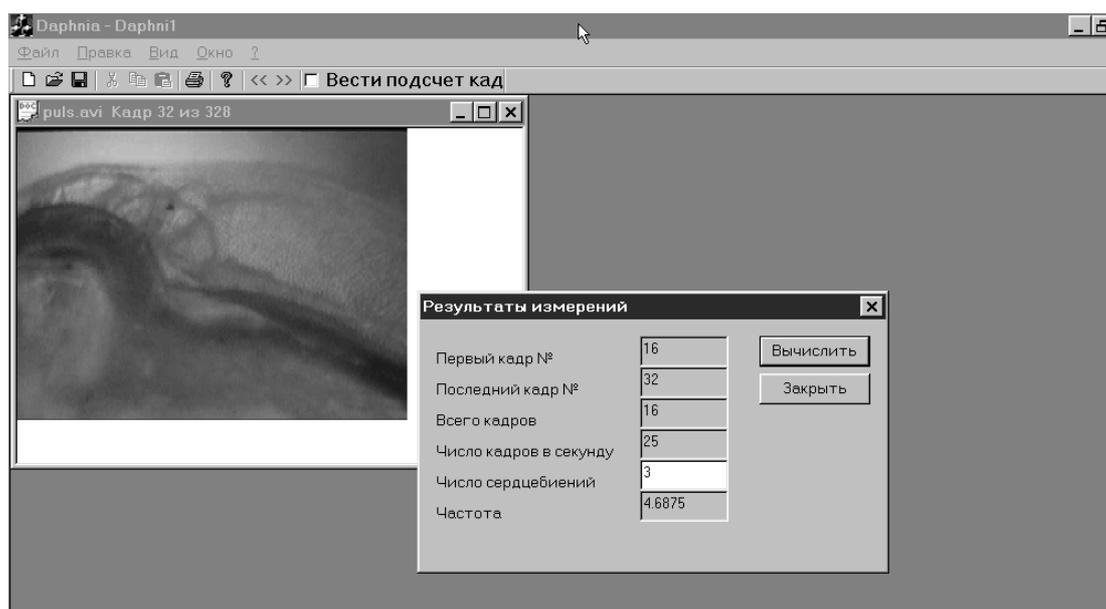


Рис. 16. Схема обработки видеоинформации

Для действующего переменного магнитного поля на частотах от 3 до 16 Гц источником поля служил вращающийся диск диаметром 25 см, на котором радиально были прикреплены чередующиеся по полярности постоянные магниты с осью намагничивания, перпендикулярной плоскости диска (рис. 17). Помещенный непосредственно под камеру с дафнией диск с помощью электродвигателя вращался в горизонтальной плоскости с фиксированной скоростью, обеспечивающей наличие в любой точке рабочей камеры переменного поля заданной частоты. Амплитуда магнитного поля H внутри камеры вблизи ее дна составляла 25 мТл. Время воздействия переменного магнитного поля составило 1 час.

Изменение частоты сердцебиений дафний регистрировалось для группы из 40 особей. При проведении исследования каждая дафния подвергалась воздействию магнитного поля в течение 1 часа. Измерение частоты биений сердца дафнии проводилось до и после воздействия магнитного поля. Результаты измерений сдвига (увеличения) частоты сердцебиений в зависимости от частоты магнитного поля приведены на рис. 18. Линией обозначена усредненная по всем точкам зависимость сдвига частоты серд-

цебиений дафний от частоты магнитного поля. При проведении измерений для контрольной группы наблюдался разброс в изменении частоты сердцебиений $\pm 0,1$ Гц.

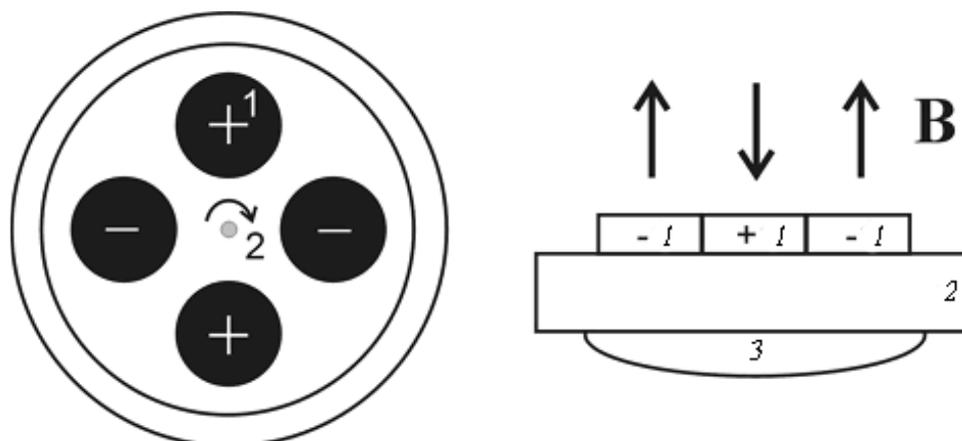


Рис.17. Схема установки для получения переменного магнитного поля: **B** – вектор индукции магнитного поля, *1* – магниты, *2* – вращающийся диск, *3* – неподвижный держатель

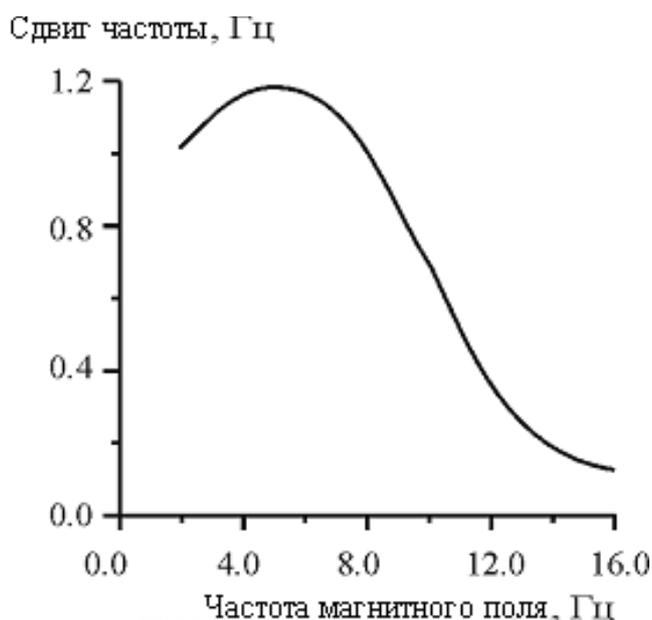


Рис. 18. Зависимость сдвига частоты сердцебиений дафний от частоты магнитного поля

Как следует из полученных результатов, наблюдается немонотонная зависимость в изменении (увеличении) частоты сердцебиений в результате воздействия магнитного поля, при этом максимум сдвига частоты наблюдался при частоте внешнего магнитного поля, близкой к частоте сердцебиений дафнии. Отметим, что изменение (уменьшение) частоты сердечного ритма авторами работы [2] связывалось с вредным воздействием вводимых в водную среду примесей. При частоте внешнего магнитного поля более 16 Гц сдвига частоты сердцебиений практически не наблюдалось, что совпадает с данными работы [3].

В настоящее время имеется ряд публикаций, например [3, 137, 138], свидетельствующих о том, что магнитное поле может влиять на водную среду. В проводимых опытах мы попытались оценить роль такого «намагничивания» водной среды на частоту биений сердца дафнии. Для этого водная среда подвергалась описанному выше воздействию переменного магнитного поля в течение 1 – 2 часов. После этого в водную среду помещались дафнии. Для контрольной группы использовался тот же состав водной среды, но на нее воздействия магнитным полем не производилось, при этом регистрируемый разброс в изменении частоты сердцебиений у каждой дафнии был незначительным. До и после воздействия «намагниченной» водной среды на исследуемую группу дафний контролировалась частота их сердцебиений. Было обнаружено также, что наибольшее изменение частоты сердцебиений происходило при воздействии на водную среду магнитного поля с частотами, близкими к частоте сердцебиений дафний (4 – 7 Гц). Как следует из результатов измерений, при помещении дафний в намагниченную водную среду усредненное значение сдвига частоты составило 0,7 Гц, что приблизительно в 2 раза меньше, чем усредненное значение сдвига частоты, полученное при воздействии магнитного поля на дафний, находящихся в водной среде. Полученные результаты можно считать своеобразным подтверждением того, что при воздействии магнитного поля изменяется состояние водной среды, что приводит к существенному изменению сердечного ритма дафний.

Обнаруженная зависимость отклика дафнии на приложенное магнитное поле была использована для оценки возможности устранения последствий влияния магнитного поля. Для этого использовалось магнитное поле частотой выше 16 Гц.

Было исследовано воздействие магнитного поля частотой выше 16 Гц на воду, на которую предварительно воздействовали магнитным полем с частотой из интервала 4–7 Гц. В обработанную таким образом водную среду затем помещались дафнии, у которых измерялась частота сердечного ритма. Было обнаружено, что в этом случае, в отличие от описанного выше, сдвиг частоты сердцебиений отсутствует. Подобные явления можно связать со своеобразным «размагничиванием» водной среды. При этом обнаружена зависимость степени размагничивания водной среды от продолжительности воздействия на намагниченную водную среду переменного магнитного поля повышенной частоты. На рис. 19 приведена зависимость сдвига частоты биений сердца дафний от продолжительности размагничивания водной среды на частоте 16 Гц. Для размагничивания водной среды достаточно воздействия на нее переменным магнитным полем на частоте 16 Гц в течение 5 минут.

Показано влияние переменного магнитного поля на частоту сердцебиений дафнии, находящейся в водной среде, в диапазоне частот от 1 до 16 Гц с амплитудой 25 мТл. Обнаружены характерные частоты переменного магнитного поля, при которых сдвиг частоты сердцебиений дафнии максимален. При этом максимум сдвига частоты наблюдался при частоте

внешнего магнитного поля, близкой к частоте ее сердечного ритма в отсутствие внешних воздействий.

Существенное увеличение частоты сердечного ритма наблюдается при помещении дафнии в водную среду, на которую предварительно воздействовало магнитное поле с частотой из интервала 4–7 Гц, что можно понимать как своеобразное «намагничивание» воды. Это намагничивание исчезает при воздействии на воду магнитным полем с частотой более 16 Гц.

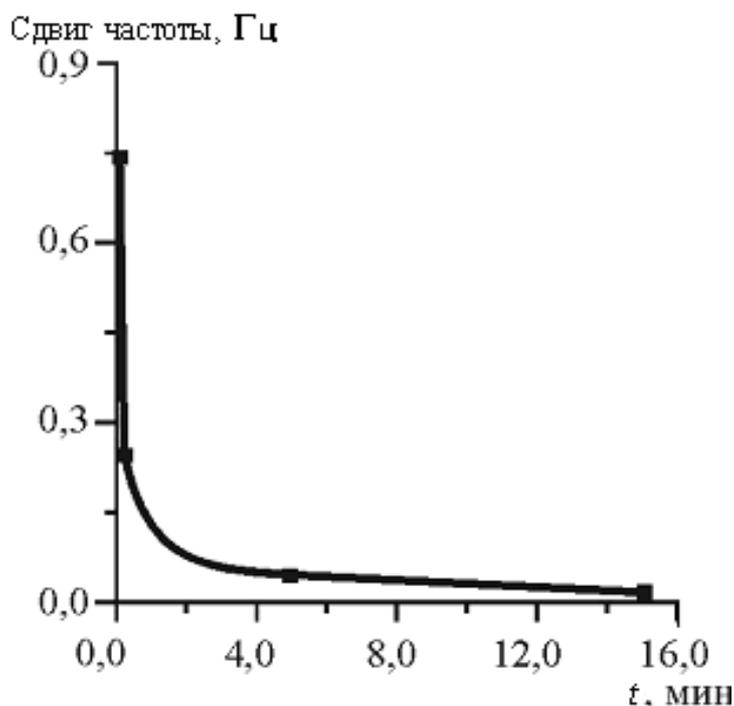


Рис. 19. Зависимость сдвига частоты биений сердца дафний от продолжительности размагничивания водной среды

Обнаруженные эффекты могут быть использованы для анализа влияния внешних электрических и магнитных полей на живые организмы, оценки степени воздействия переменного магнитного поля на водную среду и разработки методов защиты от вредного воздействия магнитных полей.

2.4. Зависимость частоты сердцебиения дафний от величины магнитного поля

Исследованию воздействия электромагнитных полей на жизнедеятельность организмов, применению магнитных полей в различных областях медицины, влиянию инфранизкочастотных магнитных полей на рост колоний микроорганизмов, ранний онтогенез растений, эмбриогенез млекопитающих посвящено большое число публикаций например [166–169].

Случайные изменения природных магнитных полей, например, магнитные бури, являются помехами регулированию процессов жизнедеятельности в организме [167], так как естественный магнитный полевой фон

Земли (0,06 мТл [129]) представляет собой необходимое, эволюционно сложившееся условие для нормальной жизнедеятельности биологических систем. Можно предположить, что помехами являются также и искусственные магнитные поля, параметры которых выходят за пределы эволюционно сформировавшихся адаптационных возможностей организмов.

Были проведены исследования по влиянию магнитных полей, близких по величине индукции к естественному магнитному полю Земли, на сердцебиение дафнии, а также исследования изменения сердечного ритма дафнии при одновременном воздействии на водную среду нескольких факторов.

Схемы установок, используемых при измерениях, приведены на рис. 15 и 17. Изменение частоты сердцебиений дафний регистрировалось для группы из 40 особей. Была измерена зависимость сдвига частоты сердцебиений дафний от величины индукции переменного магнитного поля частотой 5 Гц (рис. 20). Величина индукции изменялась от 0 до 25 мТл. Время действия магнитного поля составляло 1 час.

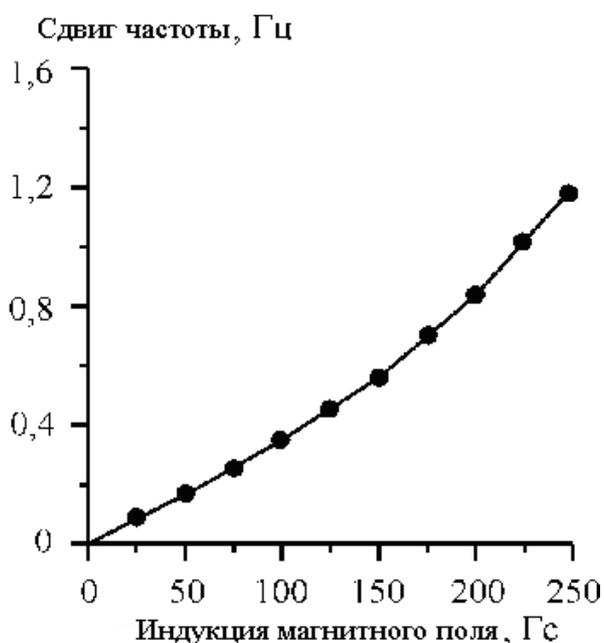


Рис. 20. Зависимость сдвига частоты сердцебиений дафний от индукции магнитного поля

Из результатов измерений, приведенных на рис. 20, видно, что при уменьшении магнитного поля до величины $\sim 0,06$ мТл, при том же времени воздействия, изменение частоты сердцебиений дафний становится исчезающе малым. Таким образом, было сделано предположение о том, что при воздействии переменного магнитного поля с индукцией около 0,06 мТл для изменения частоты сердцебиений дафнии требуется значительно большее время воздействия. Это предположение было проверено экспериментально. Время воздействия было увеличено до 6 часов.

Измерение частоты биений сердца дафнии проводилось до и после воздействия магнитного поля. Результаты измерений сдвига (увеличения)

частоты сердцебиений в зависимости от частоты магнитного поля приведены на рис. 21. Линией обозначена усредненная по всем точкам зависимость сдвига частоты сердцебиений дафний от индукции магнитного поля.

При проведении измерений для контрольной группы наблюдался разброс в изменении частоты сердцебиений $\pm 0,1$ Гц. Как следует из полученных результатов, наблюдается немонотонная зависимость от величины индукции магнитного поля при одном и том же времени воздействия в изменении (увеличении) частоты сердцебиений в результате воздействия магнитного поля, при этом максимум сдвига частоты наблюдался при амплитуде внешнего магнитного поля равной 0,4 мТл, что примерно в 7 раз превышает среднее значение индукции естественного магнитного поля Земли. Отметим, что для контрольной группы дафний, помещенных в аналогичные условия, но в отсутствии воздействия магнитного поля частота сердцебиений в среднем оставалась неизменной.

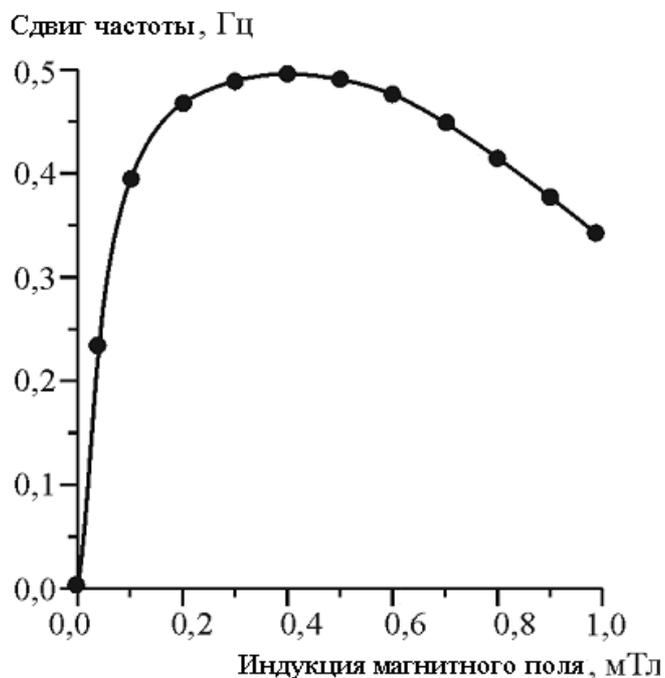


Рис. 21. Зависимость сдвига частоты сердцебиений дафний от индукции магнитного поля

2.5. Влияние магнитного поля на частоту сердечных сокращений дафний, помещенных в водный раствор фенола

Исследования зависимости сдвига частоты сердцебиений дафнии от концентрации фенола при одновременном воздействии переменного магнитного поля частотой 4–5 Гц и амплитудой 25 мТл в течение 1 часа [170] показали, что при малых концентрациях фенола действие магнитного поля превалирует над воздействием химического фактора, и только при концентрациях фенола больших 8 мг/л влияние магнитного поля “подавляется” фенолом. С целью дальнейшего изучения были проведены измерения час-

тоты сердцебиений дафнии при воздействии фенола и переменного магнитного поля частотой 5 Гц и амплитудой 0,4 мТл. Изменение частоты сердцебиений дафний регистрировалось для группы из 40 особей один раз в час. Дафнии предварительно помещались в раствор фенола концентрацией 10 мг/л на пять минут, т.е. подвергались стрессовому воздействию, после чего возвращались в среду обитания. Измерение частоты биений сердца дафнии проводилось до и после воздействия фенола. Результаты измерений сдвига частоты сердцебиений дафний в зависимости от времени воздействия магнитного поля приведены на рис. 22. Каждая линия на рисунке представляет собой усредненную по всем точкам зависимость сдвига частоты сердцебиений дафний от времени воздействия магнитного поля. При проведении измерений для контрольной группы наблюдался разброс в изменении частоты сердцебиений $\pm 0,1$ Гц.

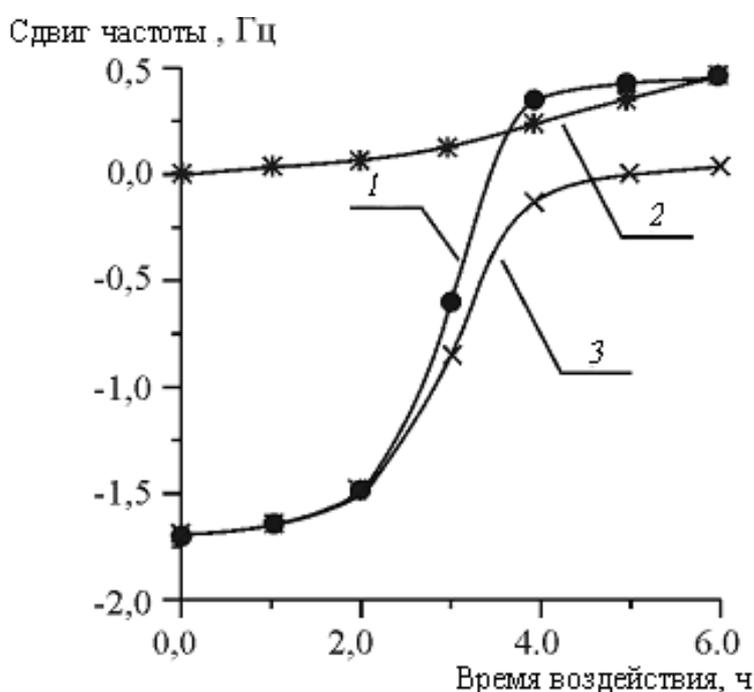


Рис. 22. Зависимость сдвига частоты сердцебиений дафний от времени воздействия магнитного поля: 1 – с фенолом и магнитным полем; 2 – с магнитным полем без фенола; 3 – с фенолом без магнитного поля

Как следует из полученных результатов (см. рис.22), наблюдается изменение частоты сердцебиений в результате воздействия магнитного поля, при этом близкое к максимальному значению сдвига частоты сердцебиений дафний, помещенных предварительно в фенол (кривая 1), наблюдалось на 2 часа раньше, чем у тех дафний, которые находились под влиянием переменного магнитного поля в естественной среде обитания (кривая 2). Отметим, что для группы дафний, помещенных в раствор фенола (кривая 3), в отсутствие воздействия магнитного поля частота сердцебиений приблизительно через 4–5 часов после начала эксперимента возвращалась к исходному значению.

Было исследовано воздействие магнитного поля индукцией 0,4 мТл и частотой 5 Гц на дафний, помещенных в раствор с низким содержанием фенола различной концентрации. Различие в сдвиге частоты сердцебиений дафний, помещенных в магнитное поле, становится заметным через 2,5–3 ч после начала эксперимента (рис.23). При этом наличие магнитного поля приводило к запаздыванию сдвига частоты сердцебиений дафнии, что свидетельствовало об уменьшении влияния фенола как патогенного фактора на дафнию, помещенную в переменное магнитное поле с заданными характеристиками. Следует отметить, что у дафний, помещенных в магнитное поле, в растворе фенола увеличивалась продолжительность жизни приблизительно на 15–20 минут, что свидетельствует о восстанавливающем воздействии магнитного поля.

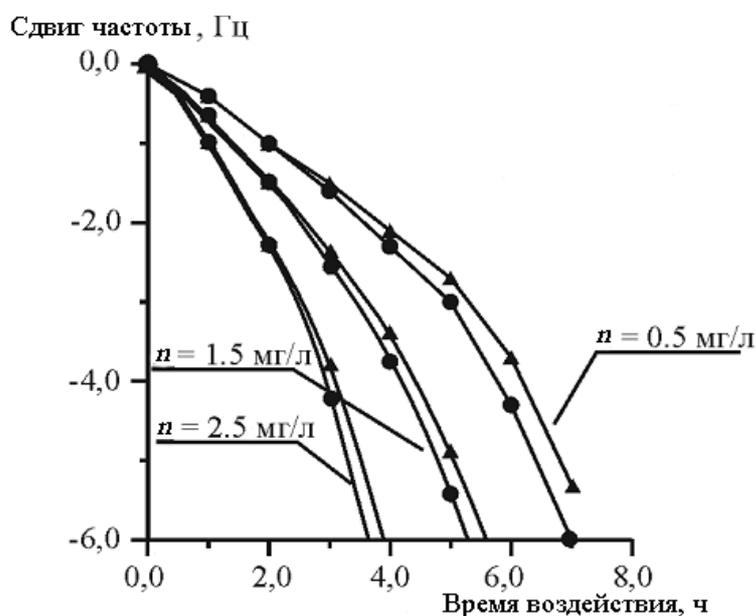


Рис.23. Зависимость сдвига частоты сердцебиений дафний, помещенных в раствор фенола различной концентрации от времени воздействия магнитного поля:
 ● — с фенолом без магнитного поля,
 ▲ — с фенолом и магнитным полем

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что при воздействии на дафний слабым переменным магнитным полем низкой интенсивности с частотой около 5 Гц для обеспечения существенных сдвигов частоты их сердцебиения необходимо значительное (до нескольких часов) увеличение длительности воздействия. Возможно это обусловлено механизмами адаптации биологических периодических процессов, достигнутыми в процессе эволюции живых систем, к стрессовому воздействию колебаний магнитного поля Земли.

Показано также, что при наличии в водной среде токсикантов, например фенола, увеличивается чувствительность дафнии к действию магнитного поля, что выражается в существенном изменении ее сердечного ритма.

2.6. Совместное действие постоянного и переменного магнитных полей на частоту сердцебиений дафнии

Исследовано влияние совместного действия постоянного и переменного магнитных полей на частоту сердцебиений дафнии. Показано, что наличие постоянной составляющей магнитного поля приводит к заметному уменьшению сдвига частоты сердцебиений дафнии, обусловленного переменной составляющей. При этом с увеличением постоянного магнитного поля частотная зависимость сдвига частоты сердцебиений дафнии становится все менее и менее выраженной.

Изучению совместного действия переменного и постоянного магнитных полей на живые организмы посвящено большое количество работ. Так, например, используя постоянное магнитное поле и переменное магнитное поле 50 Гц напряженностью от 240 до 560 кА/м, авторы [11, 43, 49, 272 – 275] показали, что при любых параметрах поля, действовавшего на мышей, крыс, морских свинок, кроликов от 15 мин до многих месяцев, практически во всех тканях и органах наблюдались отчетливо регистрируемые морфологические изменения. Наиболее типичными из них являются набухание клеток различных органов, появление отеков, расширение капилляров, жировая дистрофия, отдельные кровоизлияния. «Шоковым» органом, по терминологии этих авторов, являются семенники, где обнаруживается резкое обеднение зрелыми клетками сперматогенного эпителия. Все эти изменения обратимы и в последствии (а в ряде случаев при продолжающемся действии) возвращаются к норме.

Авторами [7, 11, 275, 276] отмечались также морфологические изменения в нервной ткани, миокарде, почках, печени, митохондриях, картине митотической активности крови, кровеносных сосудах у различных животных в постоянных, переменных и импульсных магнитных полях 400 А/м – 500 кА/м.

Совокупность морфологических изменений, наблюдающихся под действием электромагнитных полей, позволяет считать, что в большинстве случаев регистрируемые нарушения не являются катастрофическими. Нарастая в первые сутки воздействия, они постепенно стабилизируются, затем уменьшаются и возвращаются к норме. Наиболее сильные изменения обнаруживаются в органах и тканях с повышенным уровнем метаболизма, но и в этом случае наблюдается четкая тенденция к нормализации после прекращения действия поля.

Однако авторы этих работ не обосновывают выбор параметров электромагнитных полей и времени их воздействия, поэтому остается неясным, почему в экспериментах использовались, в частности, те или иные частоты и амплитуды. В одних работах воздействие проводилось в течение нескольких минут, а в других несколько суток и более, поэтому неизвестно в каком именно случае достигается максимальный эффект.

В других исследованиях изменения скорости роста микроорганизмов при действии постоянного магнитного поля 9–1100 кА/м и переменного магнитного поля 18 кА/м не были обнаружены [276].

В работах [170, 256] сообщалось об обнаружении влияния переменного низкочастотного (3–10 Гц) магнитного поля на частоту сердечных сокращений дафнии, используемой в качестве биоиндикатора [133]. При воздействии на дафнию, помещенную в водную среду магнитного поля с индукцией 25 мТл и частотой около 6 Гц (близкой к средней частоте сердцебиений дафнии), наблюдалось максимальное увеличение частоты сердцебиения на 20%. Представляет интерес исследование влияния на частоту сердцебиений дафнии совместного действия переменного и постоянного магнитных полей.

Для действующего переменного магнитного поля на частотах от 3 до 16 Гц источником поля служил вращающийся диск диаметром 25 см, на котором радиально были прикреплены чередующиеся по полярности постоянные магниты с осью намагничивания, перпендикулярной плоскости диска. Помещенный непосредственно под камеру с дафнией диск с помощью электродвигателя вращался в горизонтальной плоскости с фиксированной скоростью, обеспечивающей наличие в любой точке рабочей камеры переменного поля заданной частоты. Амплитуда переменного магнитного поля H внутри камеры вблизи ее дна составляла 25 мТл. В эксперименте использовался постоянный магнит с индукцией вблизи его поверхности 1,2 мТл, расположенный ортогонально переменному магнитному полю. Время совместного воздействия переменного и постоянного магнитных полей составляло 1 час.

Изменение частоты сердцебиений дафний регистрировалось для группы из 40 особей. При проведении исследования каждая дафния подвергалась совместному воздействию переменного и постоянного магнитных полей в течение 1 часа. Измерение частоты биений сердца дафнии проводилось до и после воздействия магнитного поля. Результаты измерений сдвига (увеличения) частоты сердцебиений в зависимости от частоты переменного магнитного поля приведены для разных значений индукции постоянного магнитного поля на рис. 24. Линией 4 обозначена усредненная по всем точкам зависимость сдвига частоты сердцебиений дафний от частоты магнитного поля при фиксированном значении индукции постоянного магнитного поля. При проведении измерений для контрольной группы наблюдался разброс в изменении частоты сердцебиений $\pm 0,1$ Гц.

Из результатов измерений, приведенных на рис. 24, видно, что при уменьшении индукции постоянного магнитного поля до величины $\sim 0,6$ мТл (кривая 3), при сохранении времени воздействия, изменение частоты сердцебиений дафний растет, приближаясь к значениям, полученным при переменном магнитном поле в отсутствие постоянного магнитного поля (кривая 4) [133].

На рис. 25 приведена зависимость сдвига частоты сердцебиений дафнии от индукции переменного магнитного поля частотой около 6 Гц (близкой к средней частоте сердцебиений дафнии) при фиксированном значении индукции постоянного магнитного поля $\sim 1,2$ мТл.

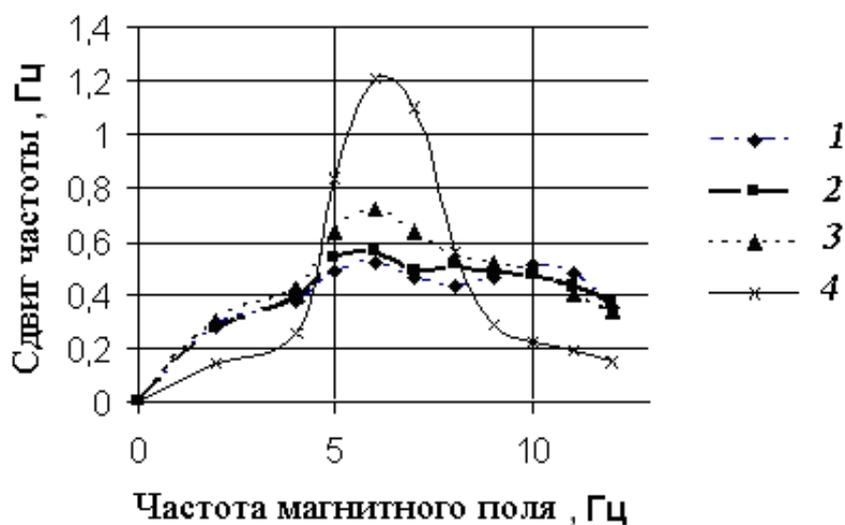


Рис. 24. Зависимость сдвига частоты сердцебиений дафнии от частоты переменного магнитного поля при одновременном воздействии постоянным магнитным полем с различными значениями индукции: 1 – 1,2 мТл; 2 – 0,6 мТл; 3 – 0,8 мТл; 4 – в отсутствии постоянного магнитного поля

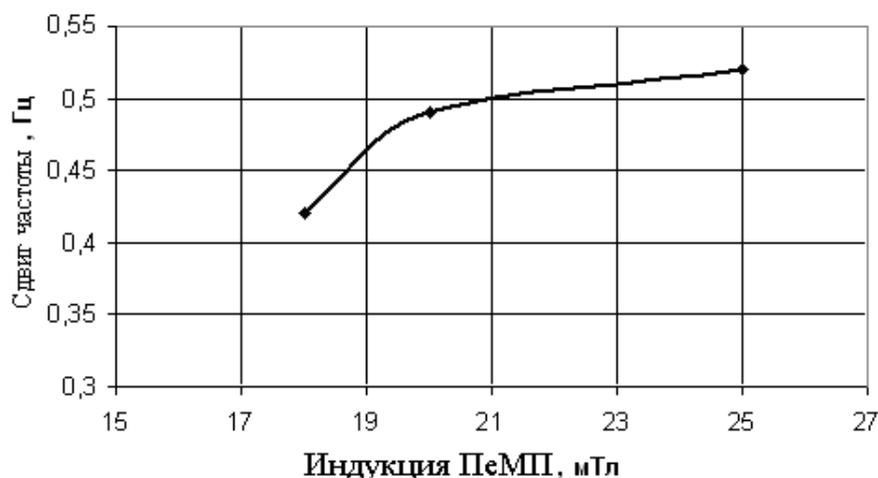


Рис. 25. Зависимость сдвига частоты сердцебиений дафний от индукции переменного магнитного поля частотой около 6 Гц при одновременном воздействии постоянного магнитного поля индукцией 1,2 мТл

Таким образом, наличие постоянной составляющей магнитного поля приводит к заметному уменьшению сдвига частоты сердцебиений дафнии. При этом с увеличением постоянного магнитного поля частотная зависимость сдвига частоты сердцебиений дафнии становится все менее и менее выраженной. Начиная с некоторого уровня значений индукции переменного магнитного поля рост сдвига частоты сердцебиений дафнии с ростом амплитуды переменного магнитного поля заметно замедляется.

Наблюдающиеся закономерности могут быть использованы для объяснения результатов действия полей на водную среду и биообъекты.

2.7. Действие переменного магнитного поля на бактериальные клетки *Escherichia coli*

В основе механизма влияния магнитных полей на биологические объекты может лежать действие на их структурные составляющие – клетки. Наиболее изученными, с точки зрения действия различных физических излучений, являются бактерии *Escherichia coli* [175]. Для кишечной палочки (*E.coli*) аттрактантами являются кислород, N-ацетил-D-глюкозамин, D-галактоза, D-глюкоза, L-аспартат, L-серин и некоторые другие соединения [176–178], а репеллентами – жирные кислоты, спирты, гидрофобные аминокислоты и другие вещества [176, 178, 179]. В качестве аттрактантов или репеллентов для бактерий могут выступать не только химические соединения, но и физические факторы: свет [176, 180–182], температура [176, 181–184], электрические и магнитные поля [176, 186, 187], гравитация [176, 188–190].

Следует отметить важную роль водной среды обитания бактерий в исследовании влияния магнитного поля, поскольку магнитное поле может оказывать эффект воздействия на живые организмы опосредовано, через его действие на водную среду. Представляет интерес исследование действия магнитного поля на свойства бактериальных клеток, находящихся в водной среде.

В качестве материала для исследований использовался бесплазмидный штамм *E.coli* НВ-101 (Институт молекулярной биологии РАН им. В.А. Энгельгардта). В экспериментах единичная колония бактерий *E.coli* выращивалась в 10 мл LB-среды (10 г бактотриптона, фирма «Pronadisa»; 5 г дрожжевого экстракта, фирма «Pronadisa»; 10 г хлорида натрия; 50 мг гидроксида натрия, оба реактива фирмы «Sigma» и до 1 л дистиллированной воды, рН раствора доводили до 7,5 при 37⁰С в течение суток.

Непосредственно перед проведением экспериментов по изучению действия магнитного поля на бактериальные клетки готовили серию разведений взвеси микробных тел по стандарту мутности из суточной культуры бактериальных клеток, выросших на жидкой LB-среде:

0,1 мл LB-среды + 9,9 мл 0,9% NaCl = 10 мл (раствор I)

1 мл раствора I + 9 мл 0,9% NaCl = 10 мл раствор (II)

5 мл раствора II + 5 мл 0,9% NaCl = 10 мл раствор (III)

5 мл раствора III + 5 мл 0,9% NaCl = 10 мл раствор (IV)

5 мл раствора IV + 5 мл 0,9% NaCl = 10 мл раствор (V)

Из последнего разведения брали суспензию бактериальных клеток объемом 100 мкл и высевали на чашки Петри с твердым агаром. Твердая питательная среда готовилась из LB-среды и агара «Васто Мас Consee Agar

Base» (фирма «Difco») в пропорции 20 г агара на 1 л LB-среды. Среда автоклавировалась при 2 атм в течение 30 мин и разливалась на чашки Петри диаметром 90 мм (20 мл). Чашки стерилизовались 30 мин ультрафиолетовыми лучами. В экспериментах использовались только свежеприготовленные питательные среды.

Изучалась способность штаммов ферментировать глюкозу, лактозу, сахарозу, галактозу, маннит, сорбит, цитрат натрия, малонат натрия, орнитин, аргинин; исследовалась активность уреазы, фенилаланиндезаминазы, ацетилметилтрансферазы, образование индола.

Материал из изолированных колоний окрашивали по Грамму, оценивали однородность клеток, форму и размер, наличие спор и капсул, отношение к окраске по Грамму, интенсивность и равномерность распределения краски в клетке.

Источником внешнего переменного магнитного поля служила установка, схема которой представлена на рис. 17.

Амплитуда магнитного поля внутри камеры вблизи ее дна составляла 25 мТл при частоте 5–6 Гц. Время воздействия магнитного поля на экспериментальные образцы составило 1 час.

Облучению подвергались клетки, непосредственно нанесенные на твердый агар в объеме 100 мкл из последнего разведения. Нанесенная капля распределялась по поверхности агара либо покачиванием чашки Петри, либо микробиологической петлей. Находящиеся в виде монослоя бактериальные клетки взаимодействовали с магнитным полем независимо друг от друга. Вследствие уменьшения кооперативного эффекта между бактериальными клетками увеличивалась статистическая достоверность проводимого эксперимента.

Проницаемая для магнитных полей чашка Петри была закрыта во время проведения эксперимента, тем самым достигалась относительная стерильность и не происходили потери влаги с поверхности агара. Оба эти фактора оказываются существенными для нормального роста бактериальных клеток.

После действия магнитного поля на чашки Петри, содержащие бактериальные культуры (экспериментальная и контрольная – не обработанная полем, но выдержанная в тех же условиях, что и опытная), они были помещены в термостат на 18 часов при температуре 37⁰С. После термостатирования проводилось изучение морфологии выросших колоний в проходящем и отраженном свете, осуществлялся подсчет абсолютного числа клеточных колоний, микроскопия бактериального материала. Проводился также отсев отдельных колоний на дифференциально-диагностические среды для изучения биохимических свойств выросших колоний микроорганизмов.

Изучение морфологии бактериальных колоний проводили в проходящем и отраженном свете лампы накаливания. Подобное исследование предполагает описание формы, контуров, размеров, прозрачности и цвет-

ности выросших колоний микроорганизмов на твердых питательных средах.

Определение чувствительности микроорганизмов к антибиотикам производили методом диффузии в агар с применением стандартных бумажных дисков на плотной питательной среде. Использовалась питательная среда для определения антибиотикочувствительности микроорганизмов типа АГВ.

Суспензию 18–20-часовой культуры бактерий разводили в 10 раз изотоническим раствором хлорида натрия. Инокулят в объеме 1–2 мл наносили на поверхность питательной среды, равномерно распределяли, приоткрытые чашки подсушивали 10–15 минут.

Диски с помощью пинцета накладывали на поверхность засеянной и подсушенной среды на одинаковом расстоянии один от другого и примерно на расстоянии 2 см от края чашки. Чашки инкубировали в течение 18–20 часов при 37°C, перевернутыми кверху дном.

Измерение зоны угнетения сплошного микробного роста производили с помощью миллиметровой линейки. Оценку результатов проводили по таблице, которая содержит пограничные значения диаметров зон задержки роста для устойчивых, умеренно-устойчивых и чувствительных микроорганизмов.

Проводили определение чувствительности грамотрицательных бактерий к цефалотину, цефазолину, цефтазидиму, цефотаксиму, гентамицину, канамицину, ципрофлоксацину, левофлоксацину, офлоксацину, тетрациклину, левомицетину, карбенициллину, тобрамицину, имипиенему, меропенему, азлоциллину.

После обработки бактериальных клеток клеток *E.coli* магнитным полем и термостатирования их количество составило 1930 колоний в сравнении с 1419 колониями в контроле.

Колонии *E.coli* после обработки монослоя клеток магнитным полем имели меньший диаметр на 1 – 2 мм по сравнению с колониями, необработанными магнитным полем. Они имели выпуклую над поверхностью агара форму; округлые, ровные края; были полупрозрачными в проходящем свете.

Бактериальные клетки *E.coli* НВ-101, обработанные магнитным полем, имели замедленную по сравнению с контрольными клетками ферментацию глюкозы в аэробных условиях. Скорость окисления глюкозы возвращалась к исходной после нескольких повторных пересевов изучаемого штамма без повторного облучения магнитным полем. В данном случае можно предположить обратимое ингибирование биохимического пути, ответственного за окисление глюкозы. Другие биохимические тесты отличий между контрольными и экспериментальными штаммами не выявили (табл. 4).

Чувствительность бактерий *E.coli* к цефалотину, цефазолину, цефтазидиму, цефотаксиму, гентамицину, канамицину, ципрофлоксацину, лево-

флорксацину, офлорксацину, тетрациклину, левомицетину, карбенициллину, тобрамицину, имипиенему, меропенему, азлоциллину не изменилась.

Таблица 4. Биохимические тесты штаммов

Тест или субстрат	До обработки	После обработки
Цитрат натрия	-	-
Малонат натрия	-	-
Цитрат натрия с глюкозой	+	+
Лизин	±	±
Аргинин	-	-
Орнитин	-	-
Фенилаланин	-	-
Индол	+	+
Ацетилметилкарбинол	-	-
Уреаза	-	-
Сероводород	-	-
Глюкоза	+	+(замедленное)
β-галактозидаза	+	+
Лактоза	-	-
Маннит	+	+
Сахароза	+	+
Инозит	-	-
Сорбит	+	+
Арабиноза	+	+
Мальтоза	+	+
Подвижность	-	-

Отсутствие подавления роста колоний бактерий под действием магнитного поля указывает на отсутствие бактерицидного действия переменного магнитного поля с выбранными параметрами. Отмечается стимуляция клеточного роста после обработки клеток магнитным полем. Уменьшение диаметра колоний, то есть их размера, при увеличении абсолютного числа выросших колоний указывает, с одной стороны, на стимуляцию процессов клеточного деления, а с другой – на изменение метаболизма клеток (падение потребления глюкозы), которое имело обратимый характер.

Таким образом, можно говорить о влиянии переменного магнитного поля на обмен глюкозы при обработке клеток *E.coli* магнитным полем. По-

казано, что воздействие магнитного поля на бактериальные клетки *E.coli* стимулирует клеточный рост и процессы клеточного деления.

2.8. Влияние переменного магнитного поля низкой интенсивности на физические характеристики зерновок сорго

Было обнаружено, что при воздействии низкочастотным магнитным полем на зерновки сорго происходит уменьшение характерных для них значений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. После прекращения воздействия магнитного поля значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в течение примерно двух часов возвращаются в исходное состояние.

В работах [266,267] сообщалось о существенном изменении диэлектрической проницаемости воды и ее акустических свойств при воздействии магнитных полей с частотами из интервала 5–15 Гц. При этом отмечалось, что для достижения наибольшего влияния низкочастотного магнитного поля на воду при уменьшении его напряженности было необходимо увеличивать время воздействия. Характерные параметры магнитного поля, при которых достигается значительное изменение физических характеристик воды, были первоначально установлены по реакции на воздействие магнитного поля частоты сердцебиений дафний, используемых в качестве своеобразных биоиндикаторов [170, 267]. Наибольшее влияние на воду наблюдалось при действии переменного магнитного поля с частотой из интервала 5–15 Гц, при этом, например, для магнитного поля с индукцией 25 мТл время воздействия для достижения максимального эффекта должно быть не меньше 60 минут [266–268].

В работе [266] исследовано влияние переменного магнитного поля на физические характеристики воды СВЧ-методом. Показано, что воздействие переменного магнитного поля приводит к изменению диэлектрической проницаемости воды, при этом изменение свойств воды до некоторого устойчивого состояния происходит в течение определенного времени после начала воздействия магнитного поля.

Изучению влияния магнитных полей на биологические объекты посвящено значительное число работ [1, 43, 270–272]. Однако какого-либо обоснования выбора параметров магнитного поля (напряженности, частоты) и времени его воздействия в большинстве работ, посвященных исследованию характера воздействия магнитного поля на биообъекты, как правило, не приводится. Сложность подобного обоснования отчасти связана с тем, что механизм действия магнитных полей на биологические объекты в настоящее время не установлен. Одним из возможных механизмов биологического действия магнитных полей является их влияние на водную компоненту живых организмов. В связи с этим были выбраны такие параметры магнитного поля, при которых наблюдается его сильное влияние на физические характеристики воды.

Целью данной работы было выяснить с помощью СВЧ-методов: оказывает ли влияние переменное магнитное поле низкой интенсивности с выбранными указанным выше способом параметрами на физические характеристики зерновок растений, в качестве которых были выбраны зерновки сорго двуцветного *Sorghum bicolor* (L.) Moench (сорт Пищевое 35).

При теоретическом анализе рассматривалось распространение $TE_{10}(H_{10})$ волны в волноводе и ее отражение от слоя семян сорго 3, ограниченного диэлектрической вставкой 2 (рис.26). Измеряемая структура состоит из слоя диэлектрика толщиной L с диэлектрической проницаемостью ϵ_d и полубесконечного слоя зерновок сорго с диэлектрической проницаемостью ϵ_c .

Выражение для комплексного коэффициента отражения электромагнитной волны от полубесконечного слоя сорго в волноводе, ограниченного диэлектрической вставкой, может быть представлено в виде [270]

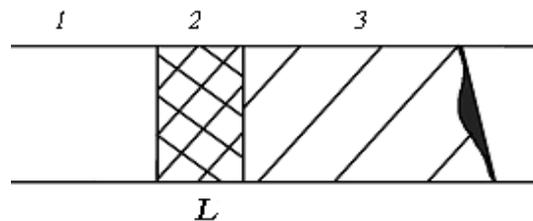


Рис. 26. Схема заполнения волновода слоем сорго: 1– незаполненная область волновода, 2– диэлектрическая вставка толщиной L , 3– полубесконечный слой сорго

$$R^* = \frac{\exp(2\gamma_d L)(\gamma_d - \gamma_0)(\gamma + \gamma_d) + (\gamma_0 + \gamma_d)(\gamma - \gamma_d)}{-\exp(2\gamma_d L)(\gamma_d + \gamma)(\gamma_0 + \gamma_d) + (\gamma_0 - \gamma_d)(\gamma - \gamma_d)}, \quad (1)$$

где $\gamma = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_c^* \epsilon_0 \mu_0}$ – постоянная распространения электромагнитной волны в воде, $\epsilon_c^* = \epsilon_c(1 - j \operatorname{tg} \sigma)$, – комплексная диэлектрическая постоянная, ϵ_c – диэлектрическая проницаемость, $\operatorname{tg} \sigma$ – тангенс угла диэлектрических потерь сорго, γ_0 – постоянная распространения в незаполненной части волновода, γ_d – постоянная распространения волны в диэлектрике, a – размер широкой стенки волновода, ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная проницаемости вакуума. Эксперимент проводился на установке, схема которой представлена на рис.27, в диапазоне частот от 26 до 29 ГГц.

Коэффициент отражения R электромагнитной волны, взаимодействующей с описанной структурой, определяется как диэлектрической проницаемостью и толщиной диэлектрика, так и диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь зерновок сорго. Возможность теоретического описания зависимости R от частоты f и измерения этой зависимости позволяет решить так называемую обратную зада-

чу: определить физические характеристики зерновок сорго и их изменения по этим зависимостям.

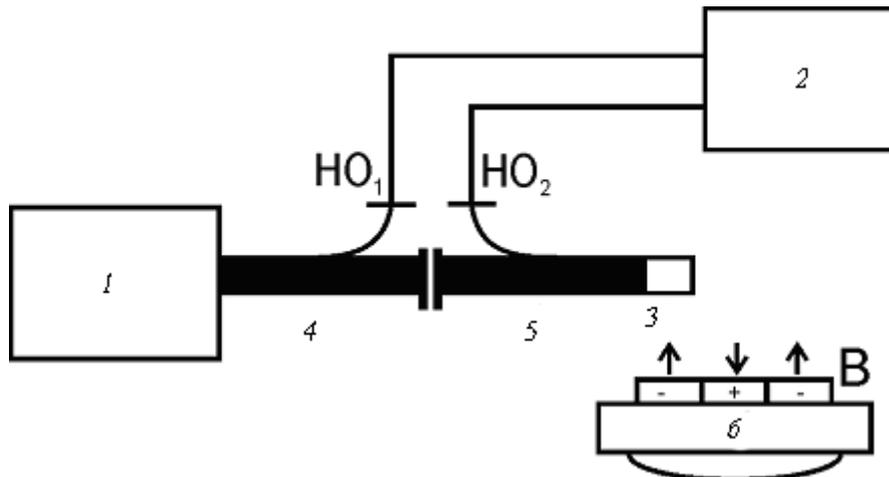


Рис. 27. Схема установки: 1 – генератор качающейся частоты Р2-65; 2 – индикатор Я2Р-67 КСВН и ослабления; 3 – измеряемая структура; 4 и 5 – направленные ответвители; 6 – источник переменного магнитного поля

Для решения обратной задачи была измерена зависимость коэффициента отражения $R(f)$ от частоты СВЧ-излучения f и рассчитывалась сумма квадратов отклонений экспериментальных значений коэффициента отражения $R_{exp}(f)$ от теоретических $R_{theor}(f)$ [271]:

$$S = \sum_{i=1}^n [R_{theor}(f_i, \epsilon_c, tg\sigma) - R_{exp}(f_i)]^2, \quad (2)$$

где ϵ_c и $tg\sigma$ – искомые параметры обратной задачи.

Решение обратной задачи состоит в том, чтобы найти такие значения искомых параметров, при которых сумма S будет иметь наименьшее значение. В точке минимума суммы S ее частные производные равны нулю. После дифференцирования S по параметрам ϵ_c и $tg\sigma$ и приравнивания к нулю частных производных $\frac{\partial S}{\partial \epsilon_c}$ и $\frac{\partial S}{\partial tg\sigma}$ в точке минимума получаем систему двух уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial \epsilon_c} = 2 \sum_{i=1}^n [R_{theor}(f, \epsilon_c, tg\sigma) - R_{exp}(f)] \frac{\partial R(f, \epsilon_c, tg\sigma)}{\partial \epsilon_c} = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial tg\sigma} = 2 \sum_{i=1}^n [R_{theor}(f, \epsilon_c, tg\sigma) - R_{exp}(f)] \frac{\partial R(f, \epsilon_c, tg\sigma)}{\partial tg\sigma} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $R_{theor}(f, \epsilon_c, tg\sigma)$ находится из выражения (1). Из решения системы уравнений (3) определяются две искомые величины: ϵ_c и $tg\sigma$.

На рис. 29 точками отмечены данные, полученные экспериментально в отсутствие магнитного поля ($B = 0$). С использованием описанной выше методики и результатов измерений получены значения диэлектрической проницаемости семян сорго 1.367, тангенса угла диэлектрических потерь

0.102 в отсутствие магнитного поля. Теоретическая зависимость модуля коэффициента отражения электромагнитной волны $R = |R^*|$ от частоты падающего СВЧ-излучения f , рассчитанная с использованием найденных значений ϵ_c и $\operatorname{tg}\sigma$, изображена на рис.28 сплошной линией. В расчетах использовались следующие параметры диэлектрической вставки: толщина 20 мм, диэлектрическая проницаемость 2,1. Диэлектрик именно с такими параметрами использовался в эксперименте.

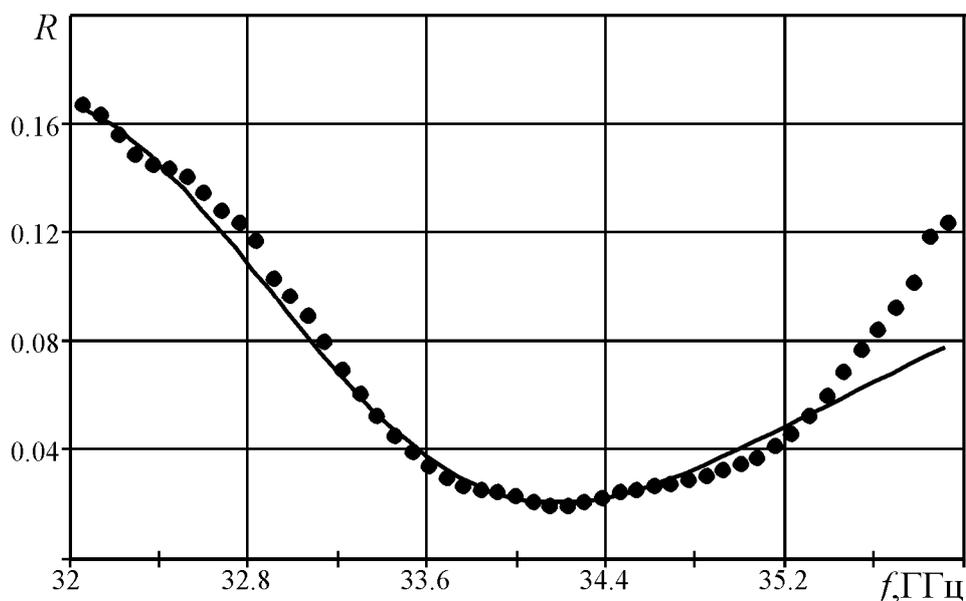


Рис. 28. Зависимость коэффициента отражения СВЧ-излучения от слоя семян сорго, ограниченного диэлектрической вставкой, толщиной 20 мм, от частоты излучения

На рис. 29 представлены результаты определения по описанной выше методике зависимости диэлектрической проницаемости (сплошная линия) и тангенса угла диэлектрических потерь сорго (пунктирная линия) от времени воздействия переменного магнитного поля частотой 10 Гц и амплитудой 30 мТл. Из приведенных на этом рисунке результатов видно, что с момента включения магнитного поля ($t = 0$) с указанными выше параметрами в течение 90 минут наблюдалось уменьшение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь сорго. Затем изменения прекращались, и в течение 50 минут наблюдений указанные величины оставались постоянными. При последующем выключении магнитного поля, которое производилось через 160 минут, наблюдалось увеличение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь сорго и их возврат к прежнему значению в течение примерно 120 минут. Таким образом, при указанных параметрах внешнего магнитного поля максимальное обратимое относительное изменение диэлектрической проницаемости сорго составило около 1,5 %, а относительное изменение тангенса угла диэлектрических потерь около 10,8%.

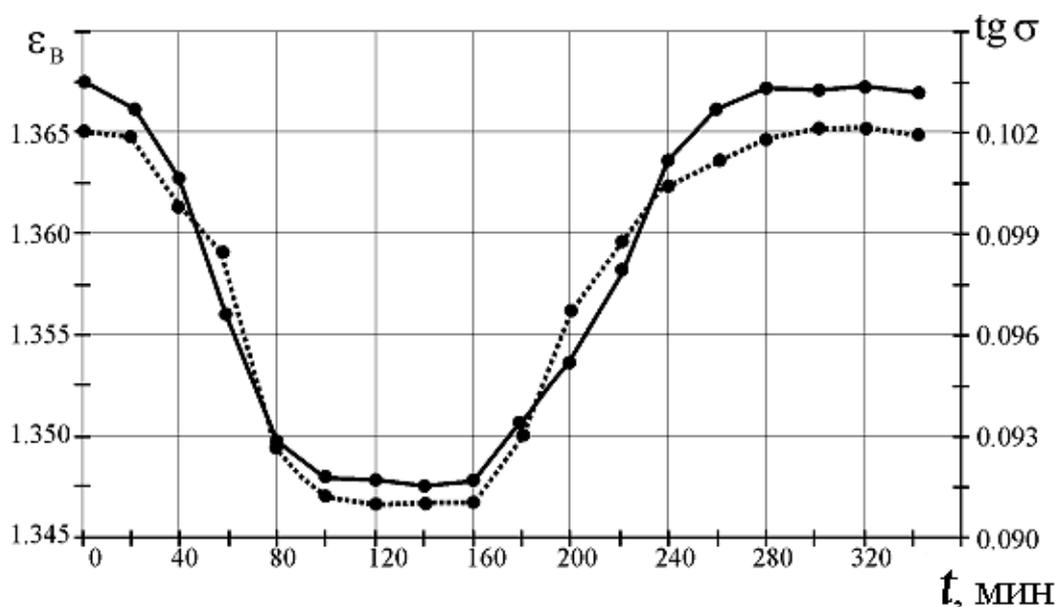


Рис. 29. Зависимость изменения диэлектрической проницаемости сорго в переменном магнитном поле (сплошная кривая), изменения тангенса угла диэлектрических потерь сорго в переменном магнитном поле (пунктирная кривая) от времени

Были проведены исследования обнаруженного эффекта для различных значений амплитуды и частоты магнитного поля. Измерения максимального изменения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь сорго от амплитуды магнитного поля B проводились на частоте $\Omega = 10$ Гц (рис.30), а от частоты магнитного поля Ω – при амплитуде $B = 30$ мТл (рис.31).

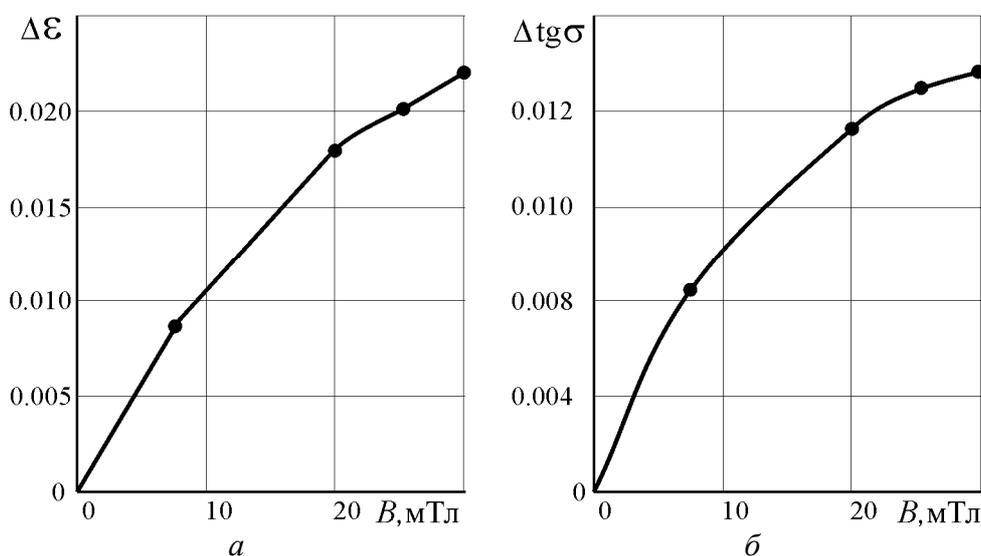


Рис. 30. Зависимость величины изменения диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) сорго от амплитуды воздействия переменного магнитного с частотой 10 Гц при времени воздействия 90 минут

Из полученных результатов следует, что зависимость изменения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь

сорго от амплитуды переменного магнитного поля близка к логарифмическому закону, а зависимость максимального изменения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь сорго от частоты изменения магнитного поля имеет максимум вблизи значения $\Omega = 10$ Гц.

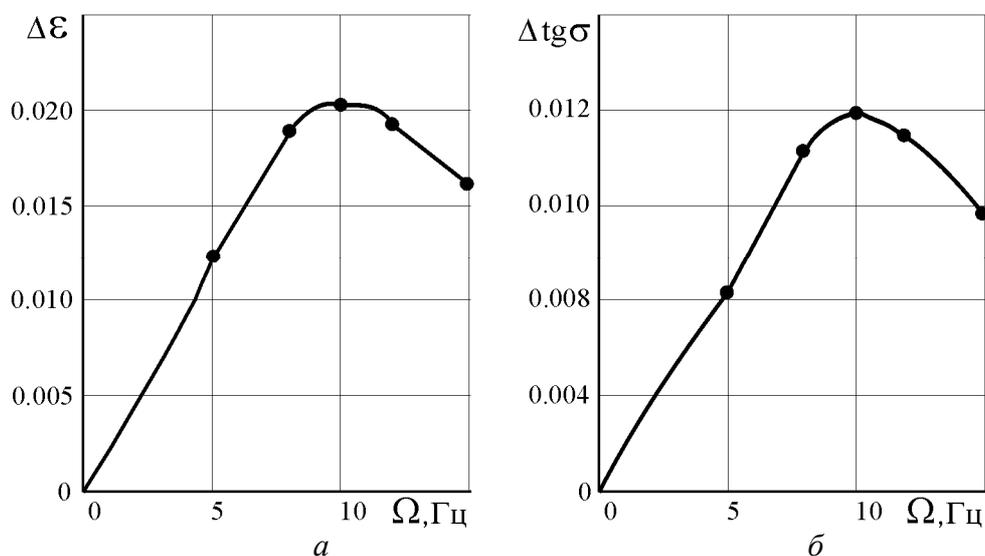


Рис. 31. Зависимость величины изменения диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) воды от частоты воздействия переменного магнитного с амплитудой 30 мТл при времени воздействия 90 минут

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что при воздействии низкочастотным магнитным полем на зерновки сорго происходит уменьшение характерных для них значений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Исследования обнаруженного эффекта при различных значениях амплитуды, частоты и времени воздействия магнитного поля показали, что максимальное изменение значений физических параметров, характерных для сорго, происходит при частоте переменного магнитного поля $\Omega = 10$ Гц при амплитуде $B = 30$ мТл и времени воздействия $t = 90$ минут. После прекращения воздействия магнитного поля значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды возвращаются в исходное состояние, при этом время возврата существенно превышает аналогичную характеристику для воды.

2.9. Химические системы для индикации действия магнитного поля на воду

В последние годы резко возрос интерес исследователей к так называемому «наличию памяти» у воды, выражающему в длительном сохранении слабых воздействий, не способных с энергетической точки зрения вызвать изменение свойств воды [3–5, 166]. В первую очередь эти эффекты наблюдаются при действии слабых электромагнитных полей.

Согласно [3] после вращения водных систем в течение 30–60 минут в постоянном магнитном поле при определенной скорости вращения возможно изменение показателя преломления воды на величину $\sim 5 \cdot 10^{-5}$. Было обнаружено, что эффект “магнитной обработки воды” не связан с наличием в ней примесей. В работе [4] исследовалось влияние слабых переменных магнитных полей, модулирующих геомагнитное поле, на тангенс угла диэлектрических потерь воды и ее электропроводность, а также на спектры поглощения и флуоресценции водных растворов родамина бЖ и белка. Было установлено, что при определенных частотах магнитного поля указанные физические характеристики имеют экстремальное значение. Стабильный эффект достигается после нескольких часов пребывания образца в поле и сохраняется в течение 3–5 часов после снятия поля. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь для жидких водных систем проводилось при $f_{из} = 160$ МГц, $T = 294^\circ\text{К}$.

В работе [5] отмечено, что молекулярные фрагменты воды обладают магнитным моментом, что свидетельствует об электронной природе взаимодействия воды с магнитным полем. Показано, что вода обладает длительной ориентационно-магнитной памятью.

В работе [166] показано, что воздействие комбинированными слабыми и сверхслабыми магнитными полями (постоянная составляющая 42 мкТл; переменная составляющая амплитудой 100 нТл, частоты 1–60 Гц) увеличивает интенсивность бесполого размножения планарий *Dugesia tigrina*. Отмечено также, что передача эффекта на планарий через предварительно обработанную магнитными полями воду, возможно, свидетельствует о роли водной среды в реализации биологических эффектов слабых магнитных полей.

В работе [171] показано, что обработка деионизированной воды высокой степени очистки слабыми магнитными полями в течение 12 ч влияет на процесс структурообразования в системе «вода–ксенон». Доказательством этого является образование кристаллов субмикронных и микронных размеров ксеноновых клатратов, тогда как в исходной воде подобные кристаллы отсутствуют. Эти изменения свойств воды сохраняются, по крайней мере, в течение двух суток после воздействия магнитных полей.

Упомянутые результаты наводят на мысль о создании химической системы, позволяющей индцировать влияние магнитного поля на воду. Если предположить, что это действие связано с перестройкой сетки водородных связей воды, то можно ожидать, в частности, изменение коагуляционных и седиментационных свойств гидрозолей. Тогда система на основе гидрозолей может рассматриваться как своего рода индикатор действия магнитного поля на воду. Эту систему можно создать искусственно, например, путем введения в водную среду растворенных в органическом растворителе красителей. В результате в воде будут образовываться коллоидные частицы. При их седиментации происходит обесцвечивание раствора. Поскольку скорость коагуляции и седиментации зависит от состоя-

ния сетки водородных связей воды в золе, появляется предпосылка для создания индикаторов на основе таких красителей. Скорость коагуляции и седиментации может дополнительно регулироваться введением полимеров, играющих роль центров коагуляции.

Таким образом, для индикации действия магнитного поля на воду могут быть использованы системы на основе гидрозолей, легко изменяющие скорость коагуляции и седиментации под его влиянием. С другой стороны, эти системы должны быть достаточно устойчивы к воздействию таких факторов, как встряхивание виал с индикатором, ошибок взвешивания и разведения при приготовлении растворов и т.д. Другими словами, эти системы должны иметь устойчивость, достаточную для получения воспроизводимых результатов, при чувствительности, достаточной для обнаружения влияния на нее магнитного поля.

В ходе предварительных экспериментов мы исследовали ряд систем, которые могли бы отвечать этим требованиям. Так, использовались водные растворы поли-N-винилапролактама, расслаивающиеся при строго определенной температуре: 33,9°C. Этот полимер образует в растворе развитую поверхность, взаимодействующую с водным окружением. Даже небольшие изменения структуры сетки водородных связей воды приводят к значительному изменению температуры расслаивания. В частности, даже низкие концентрации примесей в водной фазе можно обнаружить по изменению температуры расслаивания растворов поли-N-винилкапрохалкона [172]. Однако данная система не обладала чувствительностью, достаточной для обнаружения влияния магнитного поля на состояние ее водной фазы. Исследовалась также система, созданная на основе гидрозоля частиц из полипропилцианоакрилата, которая, как выяснилось, также не обладает достаточной чувствительностью.

Мы предположили, что объединение этих систем в единую будет при определенном соотношении обладать обоими свойствами (чувствительностью и устойчивостью) одновременно. В дальнейших исследованиях мы использовали краситель 4-N-диметиламинхалкон и полимер полипропилцианоакрилат.

Указанный краситель использовался ранее для обнаружения влияния низких концентраций различных веществ на состояние сетки водородных связей воды. Последняя существенно меняется при фазовых переходах 2-го рода, которые могут вызываться наличием низких концентраций определенных веществ в воде. Если, в соответствии с выдвинутым предположением переходы 2-го рода могут быть стимулированы в водной фазе магнитными полями, то данный краситель возможно использовать и для обнаружения влияния этих полей на состояние воды.

При создании индикаторной системы использовались следующие реактивы: ацетон (чда), этиловый спирт (чда), ацетофенон (чда), 4-N-диметилбензальдегида фирмы Вектон (Россия), вода дистиллированная, пропилицианоакрилат фирмы Fluka.

Использовались следующие растворы:

- 1) раствор полипропилицианоакрилата (ППЦА) в ацетоне, 10мг/мл;
- 2) раствор 4-диметиламинохалкона (ДМХ) в этаноле, концентрация 10^{-2} М.

(Синтез ДМХ проведен А.К. Рамазановым на кафедре органической химии Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского по методу, предложенному в работе [173]). Синтез проводился по схеме, приведенной на рис. 33.

В толстостенном стакане емкостью 100 мл, помещенном в водяную баню со льдом, растворяют 1,2 г едкого натра в 10 мл воды и 6,5 мл этилового спирта. При энергичном перемешивании к раствору прибавляют 2,6 г (0,022 моля) свежеприготовленного ацетофенона, а затем 3,65 г (0,0024 моля) 4-N-диметилбензальдегида.

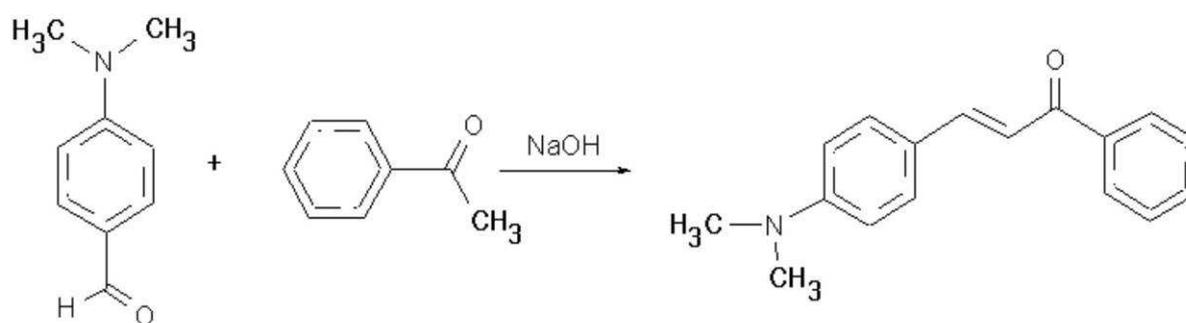


Рис.32. Схема синтеза 4-N-диметилбензилиденацетофенона (4-диметиламинохалкона)

Перемешивание продолжают в течение 4 часов, поддерживая температуру 20–30°C, смесь оставляют на 12 часов. Выпавшие кристаллы отфильтровывают и промывают этанолом. Проводят трехкратную перекристаллизацию продукта из горячего этанола. Выход составляет 4,2 г (75% от теоретического). Чистый 4-N-диметилбензилиденацетофенон – ярко-оранжевые кристаллы с температурой плавления 114°C. Чистота продукта определялась методом тонкослойной хроматографии и составила 97,4%.

Синтез ППЦА проводился следующим образом: пропилицианоакрилат помещали на дно стеклянного бокса в виде тонкой пленки и подвергали полимеризации на воздухе в течение 45 минут. Свежеприготовленный ППЦА растворяли в ацетоне.

Было установлено, что при введении в воду раствора №2 в количестве 5% объемных получается система, которая дает воспроизводимые результаты по скорости седиментации образующегося гидрозоля. Затем были приготовлены 6 серий растворов с различным содержанием раствора №1, с концентрациями компонентов, приведенными в табл. 5.

Для получения более достоверных результатов каждая серия содержала по 3 пробирки с одинаковым составом всех компонентов. Учет результатов проводился через 24 часа. Наибольшую устойчивость к коагуляции и седиментации проявили серии пробирок под номерами 4 и 5, сохранившие опалесценцию. Для большей достоверности в качестве индикаторной системы был выбран раствор с промежуточным значением концентрации ме-

жду растворами серий под номерами 4 и 5. Таким образом, состав индикаторной системы был следующим: раствор № 1 – 10 мкл, раствор № 2 – 100 мкл, вода – 1690 мкл.

Для изучения влияния намагниченной переменным магнитным полем воды на устойчивость выбранной системы были приготовлены 2 серии растворов по 3 пробирки в каждой. Первая серия (контрольная) содержала компоненты индикаторной системы, включая воду, не подвергавшуюся действию магнитного поля. В состав компонентов второй серии входила вода, прошедшая обработку переменным магнитным полем с частотой 5 Гц, индукцией 25 мТл в течение 3 часов.

Таблица 5. Объемы компонентов в пробах для выбора индикаторной системы, мкл

№ раствора	Раствор		Вода	Общий объем
	№1	№2		
1	600	100	1100	1800
2	200	100	1500	1800
3	60	100	1640	1800
4	20	100	1680	1800
5	6	100	1694	1800
6	0	100	1700	1800

Источником переменного магнитного поля служила установка, представленная на рис. 17. Через 24 часа проводилось визуальное наблюдение за цветом индикаторных систем, а также измерялась их цветность. Измерение цветности проводилось следующим образом. На плотную белую бумагу фирмы «Ballet Classics» плотности 80 г/м² наносилось по 10 мкл золя из каждой виалы. Капли имели правильную форму, близкую к сферической. После высыхания образующиеся реплики сканировались на сканере HP ScanJet 4300C в режиме «лучшая цветная фотография» с разрешением 600 точек на дюйм. Цветность определялась с помощью специально разработанной компьютерной программы для анализа видеоизображений Image Analyzer 1.0.

В программе использовалось разложение цвета в виде суперпозиции нескольких компонент по международной системе CMY, в которой компоненты принимают значения от 0 до 255. Результаты измерений представлены в табл. 6. (Приведены усредненные значения желтой компоненты (желтизны) растворов, %).

Изменение (уменьшение) желтизны раствора из намагниченной воды происходит в среднем в 1,8 раза быстрее, чем из ненамагниченной, то есть изменение свойств воды под действием магнитного поля в гидрозолье приводит к значительному изменению скорости коагуляции дисперсной фазы. Это, в свою очередь, изменяет скорость седиментации.

Таблица 6. Результаты измерений значения желтизны растворов

№ эксперимента	Контрольная вода, %	Намагниченная вода, %	Изменение желтизны раствора, кол-во раз
1	55,29	32,94	1,8±0,16
2	32,47	18,03	1,8±0,03
3	30,98	15,29	1,8±0,19

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что при воздействии на гидрозоль переменного магнитного поля происходит значительное увеличение скорости его седиментации, что отражается на цветности индикаторных растворов, тем самым позволяя индцировать это воздействие [174].

2.10. Изменение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды на СВЧ при воздействии низкочастотного магнитного поля

Согласно [4] после вращения водных систем в течение 30–60 минут в постоянном магнитном поле при определенной скорости вращения возможно изменение показателя преломления воды на величину $\sim 5 \cdot 10^{-5}$. Было обнаружено, что эффект “магнитной обработки воды” не связан с наличием в ней примесей. В работе [170] было описано влияние слабых переменных магнитных полей, модулирующих геомагнитное поле, на тангенс угла диэлектрических потерь воды и ее электропроводность, а также на спектры поглощения и флуоресценции водных растворов родамина бЖ и белка. При определенных частотах магнитного поля указанные физические характеристики имели экстремальные значения. Стабильный эффект достигался после нескольких часов пребывания образца в поле и сохранялся в течение 3–5 часов после прекращения воздействия. Спектры поглощения измерялись на спектрофотометре Specord M-40, спектры люминесценции – на спектрофлуориметре MPF-4 (Hitachi). Измерение тангенса угла диэлектрических потерь для жидких водных систем проводилось на частоте 160 МГц при температуре 294 °К.

Авторами работы [259] для установления влияния переменного магнитного поля B на физические характеристики воды был использован резонаторный СВЧ-метод измерения. Было показано, что воздействие переменного низкочастотного магнитного поля приводит к изменению диэлектрической проницаемости воды, при этом изменение свойств воды до некоторого устойчивого состояния происходит в течение определенного времени после начала воздействия магнитного поля. После прекращения воздействия магнитного поля вода через некоторый период времени возвращается в исходное состояние. При этом время возврата оказывается существенно меньшим, чем время, в течение которого происходило изменение свойств воды после начала воздействия на нее магнитным полем.

Был сделан вывод о том, что воздействие переменного магнитного поля приводит к изменению, а именно к уменьшению диэлектрической проницаемости воды, как это следует из результатов измерений СВЧ-резонаторным методом [259]. При этом с помощью использовавшейся измерительной системы изменения тангенса угла диэлектрических потерь вследствие воздействия магнитного поля обнаружить не удалось. Авторами [260] отмечалось, что количественное определение изменения характеристик воды СВЧ-методом при воздействии на нее магнитного поля можно получить при решении так называемой обратной задачи, позволяющей по характеристикам, описывающим взаимодействие СВЧ-колебаний в электродинамической системе с «намагниченной» водой, определять значения параметров воды.

В этой связи особенно важным является количественное определение изменения характеристик воды при воздействии на нее переменного магнитного поля, а именно диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, с использованием СВЧ-системы, допускающей решение обратной задачи.

При теоретическом анализе рассматривалось распространение $TE_{10}(H_{10})$ волны в волноводе и ее отражение от слоя воды 3, ограниченного диэлектрической вставкой 2 (рис. 27). Измеряемая структура состоит из слоя диэлектрика толщиной L с диэлектрической проницаемостью ϵ_d и полубесконечного слоя воды с диэлектрической проницаемостью ϵ_w .

Выражение для комплексного коэффициента отражения электромагнитной волны от полубесконечного слоя воды в волноводе, ограниченного диэлектрической вставкой, может быть представлено в виде [260]:

$$R^* = \frac{\exp(2\gamma_d L)(\gamma_d - \gamma_0)(\gamma + \gamma_d) + (\gamma_0 + \gamma_d)(\gamma - \gamma_d)}{-\exp(2\gamma_d L)(\gamma_d + \gamma)(\gamma_0 + \gamma_d) + (\gamma_0 - \gamma_d)(\gamma - \gamma_d)}, \quad (1)$$

где $\gamma = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_s^* \epsilon_0 \mu_0}$ – постоянная распространения электромагнитной волны в воде, $\epsilon_s^* = \epsilon_s(1 - jtg\sigma)$, – комплексная диэлектрическая постоянная, ϵ_s – диэлектрическая проницаемость, $tg\sigma$ – тангенс угла диэлектрических потерь воды, γ_0 – постоянная распространения в пустой части волновода, γ_d – постоянная распространения волны в диэлектрике, a – размер широкой стенки волновода, ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная проницаемости вакуума. Эксперимент проводился на установке, схема которой представлена на рис.28, в диапазоне частот от 26 до 29 ГГц.

Коэффициент отражения R электромагнитной волны, взаимодействующей с описанной структурой, определяется как диэлектрической проницаемостью и толщиной диэлектрика, так и диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь воды. Возможность теоретического описания зависимости R от f и измерения этой зависимости

позволяет решить так называемую обратную задачу: определить параметры воды по этим зависимостям.

Для решения обратной задачи была измерена зависимость коэффициента отражения $R(f)$ от частоты СВЧ-излучения f , и рассчитывалась сумма квадратов отклонений экспериментальных значений коэффициента отражения $R_{exp}(f)$ от теоретических $R_{theor}(f)$ [260]

$$S = \sum_{i=1}^n [R_{theor}(f_i, \varepsilon_B, \operatorname{tg} \sigma) - R_{exp}(f_i)]^2, \quad (2)$$

где ε_B , а $\operatorname{tg} \sigma$ – искомые параметры обратной задачи.

Решение обратной задачи состоит в том, чтобы найти такие значения искомых параметров, при которых сумма S будет иметь наименьшее значение. В точке минимума суммы S ее частные производные равны нулю. После дифференцирования S по параметрам ε_B и $\operatorname{tg} \sigma$ и приравнивания к нулю частных производных $\frac{\partial S}{\partial \varepsilon_B}$ и $\frac{\partial S}{\partial \operatorname{tg} \sigma}$ в точке минимума получаем систему

двух уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial \varepsilon_B} = 2 \sum_{i=1}^n [R_{theor}(f, \varepsilon_B, \operatorname{tg} \sigma) - R_{exp}(f)] \frac{\partial R(f, \varepsilon_B, \operatorname{tg} \sigma)}{\partial \varepsilon_B} = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial \operatorname{tg} \sigma} = 2 \sum_{i=1}^n [R_{theor}(f, \varepsilon_B, \operatorname{tg} \sigma) - R_{exp}(f)] \frac{\partial R(f, \varepsilon_B, \operatorname{tg} \sigma)}{\partial \operatorname{tg} \sigma} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $R_{theor}(f)$ находится из выражения (1). Из решения системы уравнений (3) определяются две искомые величины ε_B и $\operatorname{tg} \sigma$.

На рис. 33 точками отмечены данные, полученные экспериментально в отсутствие магнитного поля ($B = 0$). С использованием описанной выше методики получены значение диэлектрической проницаемости воды 27,64, тангенса угла диэлектрических потерь 1,908. Теоретическая зависимость модуля коэффициента отражения электромагнитной волны $R = |R^*|$ от частоты падающего СВЧ-излучения f , рассчитанная с использованием найденных значений ε_B и $\operatorname{tg} \sigma$, изображена на рис.33 сплошной линией. В расчетах использовались следующие параметры диэлектрической вставки: толщина 20 мм, диэлектрическая проницаемость 2,1. Диэлектрик именно с такими параметрами использовался в эксперименте.

На рис. 34 представлены результаты определения по описанной выше методике зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды от времени воздействия переменного магнитного поля частотой 10 Гц и амплитудой 30 мТл. С момента включения магнитного поля ($t = 0$) с указанными выше параметрами в течение 70 минут наблюдалось уменьшение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды. Затем изменения прекращались, и в течение 30 минут наблюдений указанные величины оставались постоянными. При последующем выключении магнитного поля, которое производи-

лось через 100 минут, наблюдалось увеличение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды и их возврат к прежнему значению в течение примерно 40 минут. Таким образом, при указанных параметрах внешнего магнитного поля максимальное обратное относительное изменение диэлектрической проницаемости воды составило около 0,8%, а относительное изменение тангенса угла диэлектрических потерь около 0,12%.

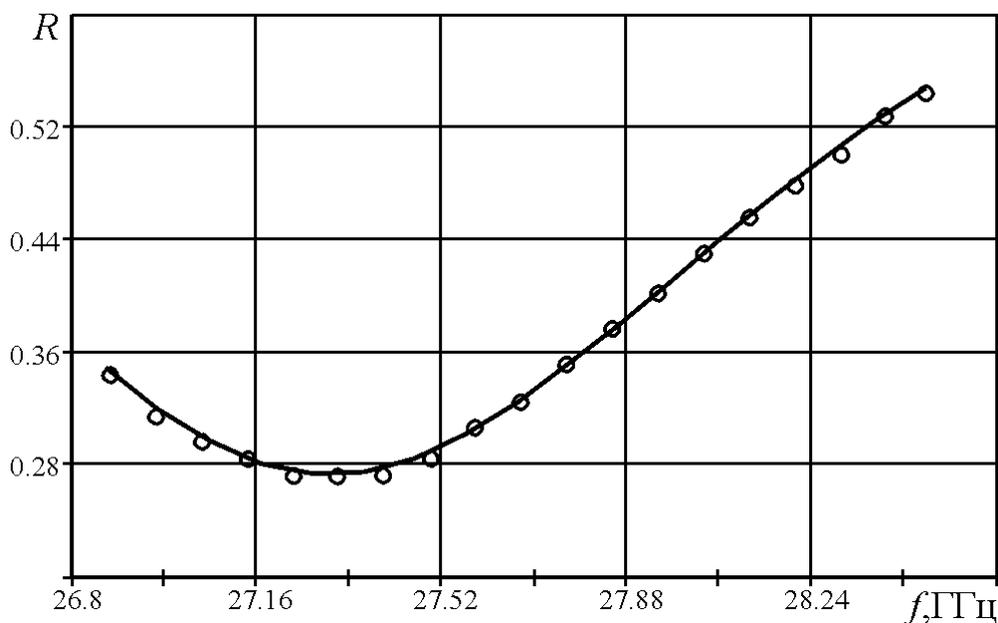


Рис. 33. Зависимость коэффициента отражения СВЧ-излучения от слоя воды, ограниченного диэлектрической вставкой, толщиной 20 мм, от частоты излучения

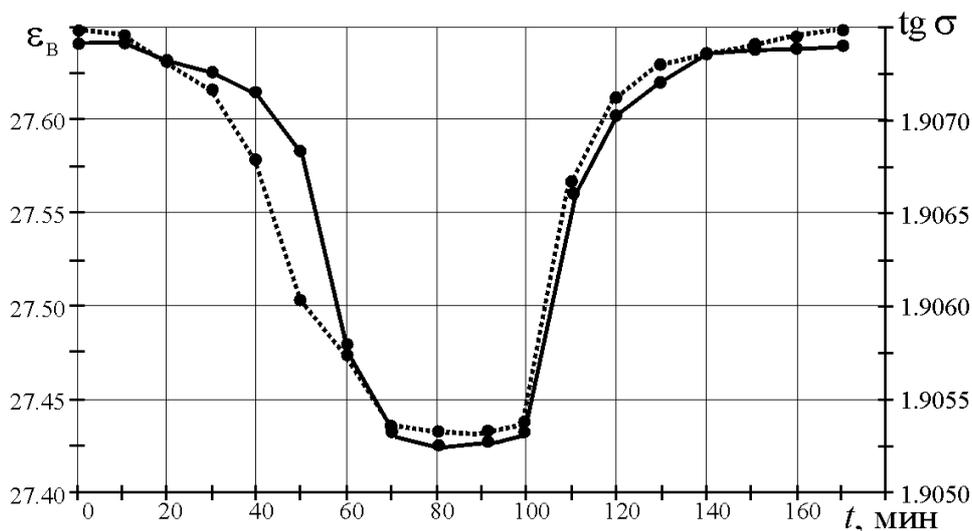


Рис. 34. Зависимость изменения диэлектрической проницаемости воды в переменном магнитном поле (сплошная кривая), изменения тангенса угла диэлектрических потерь воды в переменном магнитном поле (пунктирная кривая) от времени

Были проведены исследования обнаруженного эффекта для различных значений амплитуды и частоты магнитного поля. Измерения максимально-

го изменения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды от амплитуды магнитного поля B проводились на частоте $\Omega = 10$ Гц (рис.35), а от частоты магнитного поля Ω – при амплитуде $B = 30$ мТл (рис.36). Из полученных результатов следует, что зависимость изменения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды от амплитуды переменного магнитного поля близка к логарифмическому закону, а зависимость максимального изменения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды от частоты изменения магнитного поля имеет максимум вблизи значения $\Omega = 10$ Гц.

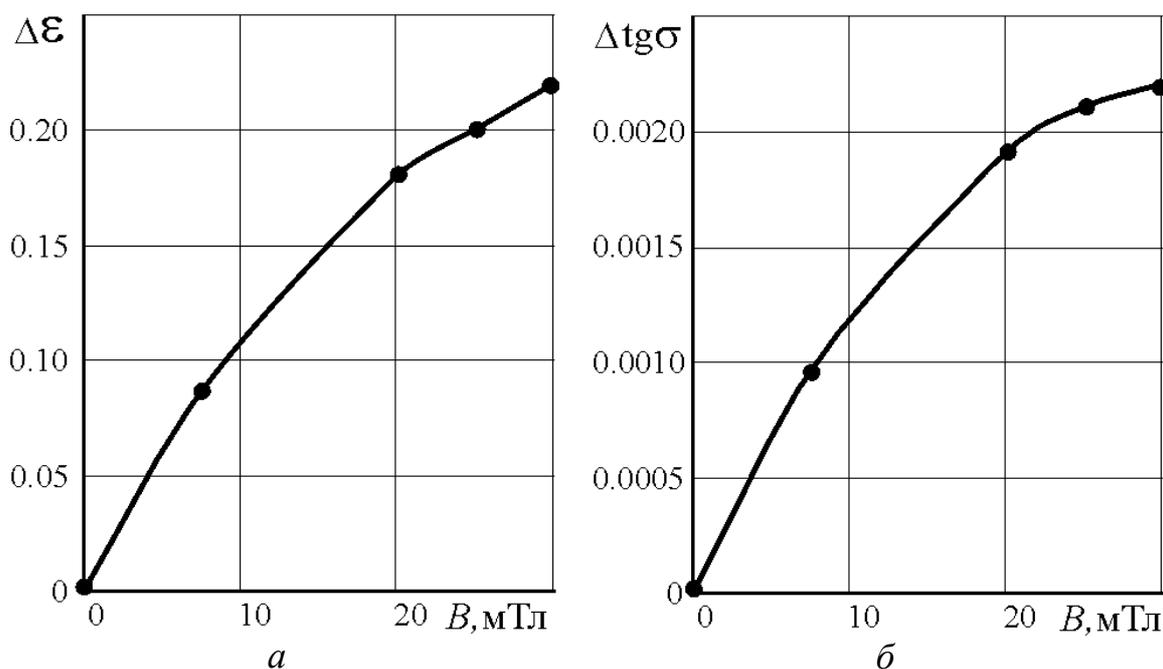


Рис. 35. Зависимость величины изменения диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) воды от амплитуды воздействия переменного магнитного с частотой 10 Гц при времени воздействия 70 минут

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что при воздействии низкочастотным магнитным полем на воду происходит уменьшение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды. Исследования обнаруженного эффекта при различных значениях амплитуды, частоты и времени воздействия магнитного поля показали, что максимальное изменение происходит при частоте переменного магнитного поля $\Omega = 10$ Гц при амплитуде $B = 30$ мТл и времени воздействия $t = 70$ минут. После прекращения воздействия магнитного поля значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды возвращаются в исходное состояние.

Интересно отметить, что полученные зависимости изменения физических характеристик воды в переменном магнитном поле качественно коррелируют с полученной ранее зависимостью изменения сдвига частоты сердцебиений дафнии от времени при воздействии переменного магнитно-

го поля частотой 6 Гц и индукцией 25 мТл [259], а также с результатами работ [260,261], а значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в отсутствие магнитного поля близки к значениям этих параметров, приведенных в работе [262].

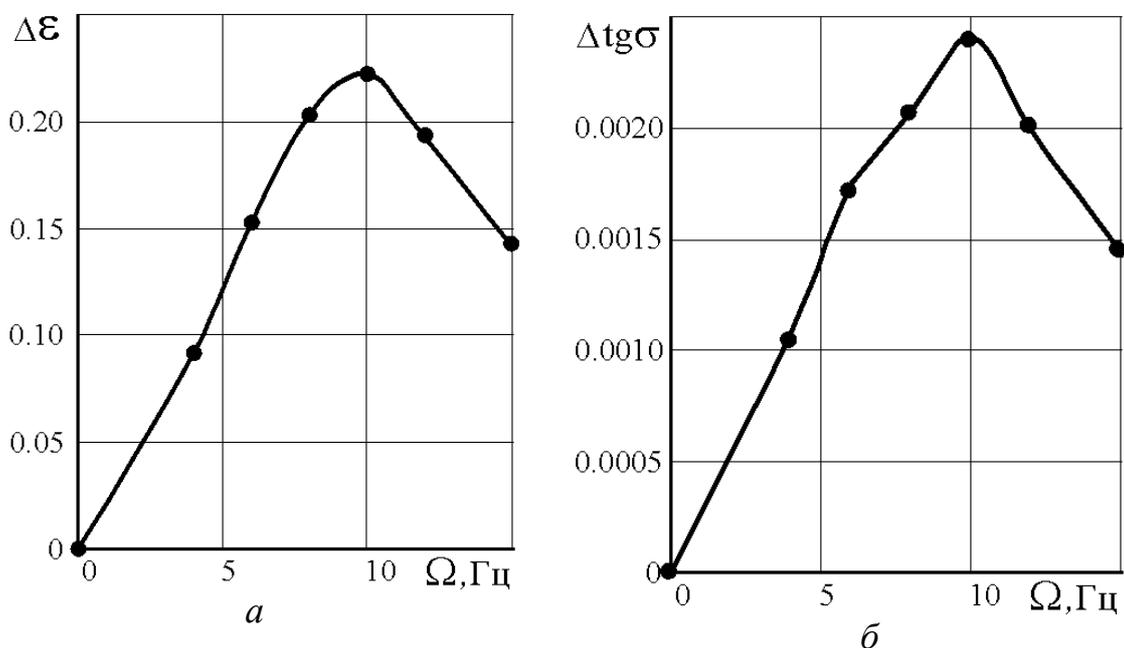


Рис. 36. Зависимость величины изменения диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) воды от частоты воздействия переменного магнитного поля с амплитудой 30 мТл при времени воздействия 70 минут

2.11. Определение влияния переменного магнитного поля на физические характеристики воды СВЧ-методом

Данные работ [2,3,4,5,170 263–264] свидетельствуют о влиянии переменного магнитного поля на водную среду и позволяют определять характерное время, а также величину магнитного поля, при которых воздействие на воду может быть зафиксировано.

Рассмотрим влияние переменного магнитного поля на физические характеристики воды с использованием СВЧ-методов.

Эксперимент проводился на установке, схема которой представлена на рис. 37.

Роль измерительного резонатора выполнял короткозамкнутый отрезок прямоугольного волновода 3 сечением $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$ с емкостной диафрагмой с размерами $7,2 \times 3,0 \text{ мм}^2$, расположенной на расстоянии 200 мкм от короткозамыкателя. Такая система, как это показано в работе [265], имеет резонансную частотную характеристику, поэтому в окрестности резонанса она весьма чувствительна к изменению нагрузки резонатора, включенной в предложенную электродинамическую систему, например, с помощью отверстия связи. Стеклоанная пробирка с бидистиллятом воды, на которую воздействовало переменное магнитное поле напряженностью 250 Гс, при-

жималась к измерительному отверстию резонатора. СВЧ- сигнал с изменяющейся частотой поступал от генератора качающейся частоты Р2-65. Сравнение уровня падающей и отраженной волны производилось с помощью рефлекметра, образованного направленными ответвителями 4 и 5. Сигналы с детекторов, установленных в ответвителях 4 и 5, подавались на индикатор КСВН и ослабления типа Я2Р-67. Короткозамыкатель резонатора представлял собой тонкую алюминиевую фольгу толщиной 20 мкм, перекрывающую канал волновода. В [266] показано, что измерительный резонатор предложенного типа позволяет отдельно проводить измерения проводимости и диэлектрической проницаемости. Для этого в стенке резонатора были сделаны два измерительных отверстия, расположенные как показано на рис.38. При этом, если открыто отверстие *б* при закрытом отверстии *а*, система оказывалась чувствительной к изменению проводимости, и практически нечувствительной к изменению диэлектрической проницаемости, а при открытом отверстии *а* и закрытом отверстии *б*, – к изменению диэлектрической проницаемости материалов.

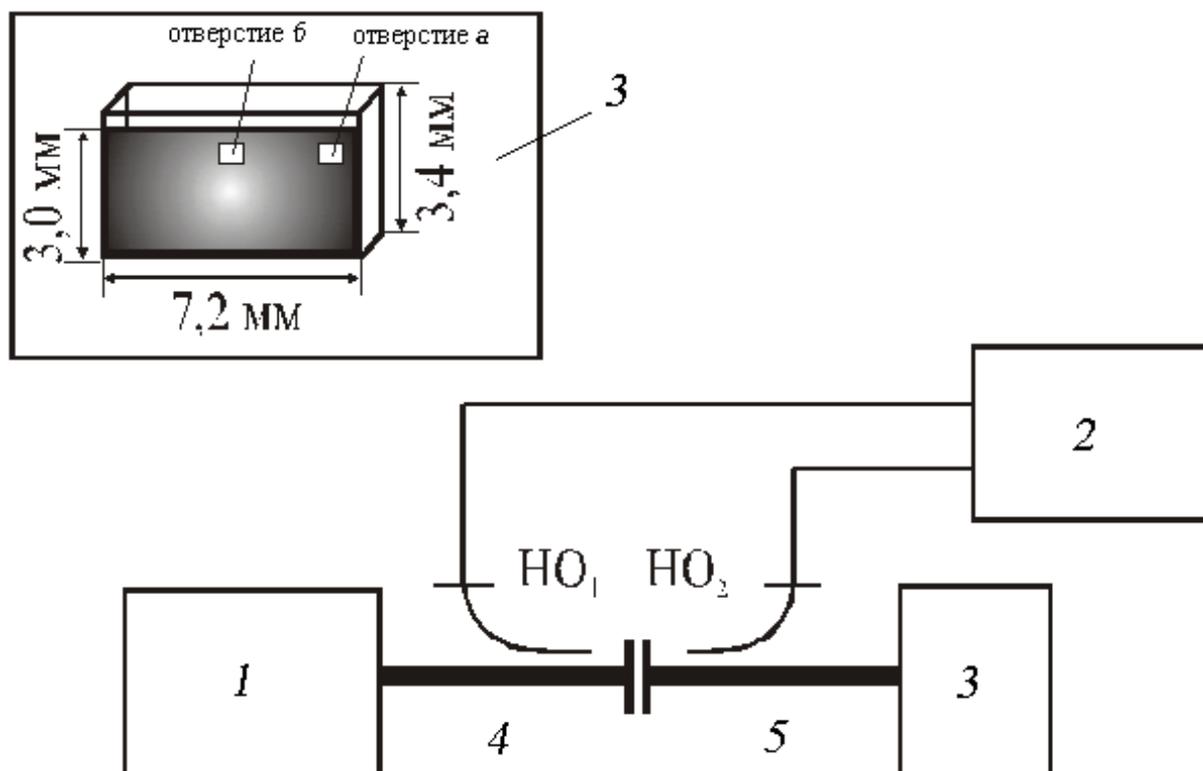


Рис. 37. Схема установки: 1 – генератор качающейся частоты Р2-65, 2 – индикатор Я2Р-67 КСВН и ослабления, 3 – измерительный резонатор, 4 и 5 – направленные ответвители

Исследования влияния переменного магнитного поля на воду проводились при температурах 15, 25 и 35°C. Для действующего переменного магнитного поля источником поля служил вращающийся диск диаметром 25 см, на котором радиально были прикреплены чередующиеся по полярности постоянные магниты с осью намагничивания, перпендикулярной плоскости диска. Помещенный непосредственно вблизи пробирки с водой

диск с помощью электродвигателя вращался в вертикальной плоскости с фиксированной скоростью, обеспечивающей наличие переменного магнитного поля заданной частоты. Амплитуда магнитного поля H , действующего на воду в ходе эксперимента, составляла 250 Гс. Данная установка позволяла получить переменное магнитное поле с частотой от 0,5 до 20 Гц. Зависимость $K_{ст}U$ (коэффициента стоячей волны) от частоты F фиксировалась каждые 20 минут.

Результаты измерений сдвига резонансной кривой при температуре воды 25°C для случая, когда резонаторная система чувствительна к изменению диэлектрической проницаемости, представлены на рис.38.

Как следует из полученных результатов, максимальный сдвиг резонансной кривой вдоль частотной оси наблюдался при намагничивании воды переменным магнитным полем с частотой 5 Гц (рис. 39). При этом происходило смещение положения минимума резонансной кривой в сторону увеличения частоты в среднем приблизительно на 0,5 ГГц, а величина $K_{ст}U$ уменьшалась на 0,75 ед. Сдвиг частоты достигал своего максимального значения примерно через час после начала воздействия магнитного поля, после чего заметного изменения резонансной частоты и $K_{ст}U$ не наблюдалось.

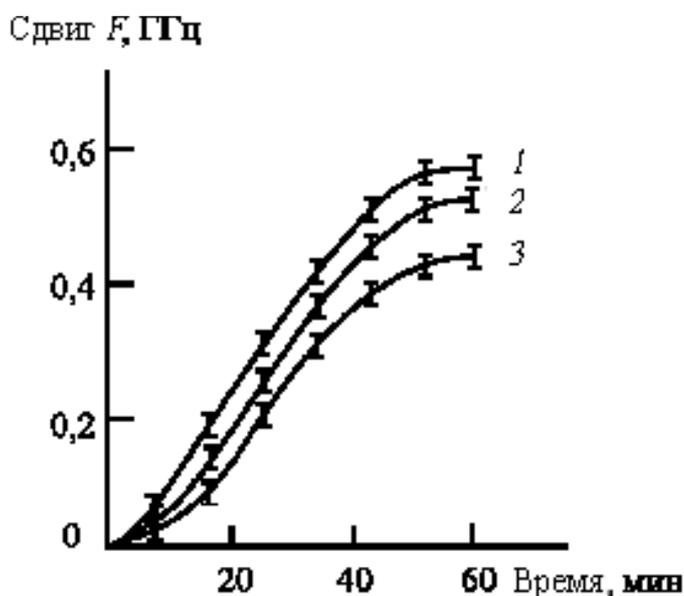


Рис. 38. Динамика резонанса во времени: 1 – частота изменения магнитного поля 5 Гц (максимальный сдвиг 0,5 ГГц); 2, 3 – 2 Гц и 12 Гц соответственно

Такое поведение резонансных кривых может свидетельствовать о происходящем в результате действия переменного магнитного поля на воду изменении ее диэлектрической проницаемости.

На рис.39 приведена зависимость $K_{ст}U$ от времени воздействия на воду при различных температурах переменного магнитного поля с частотой 5 Гц и амплитудой 250 Гс, измеренная на частоте 30,1 ГГц. Как видно из

рис. 39, *а* в первые 40 минут намагничивания $K_{стU}$ на частоте 30,1 ГГц уменьшился на 1,25 ед. Дальнейшее воздействие переменным магнитным полем не приводило к существенным изменениям значения $K_{стU}$, поэтому через 60 минут после начала эксперимента магнитное поле отключали. После прекращения воздействия магнитного поля $K_{стU}$ начинал увеличиваться и продолжал расти в течение 2 часов, стремясь к значению, характерному до начала воздействия магнитного поля (рис. 39, *б*). С дальнейшим течением времени изменений $K_{стU}$ практически не наблюдалось. Следует отметить сходство между характером зависимости сдвига частоты сердцебиений дафнии от времени воздействия переменного магнитного поля, приведенной на рис.38, и зависимостями $K_{стU}$ от времени, представленными на рис.39. Заметное увеличение частоты сердцебиений у дафнии, помещенной в водную среду, наблюдалось через 20 минут после начала облучения магнитным полем, к 60 минуте частота сердцебиения достигала максимального значения и в дальнейшем не изменялась. Из результатов измерений, приведенных на рис.39, видно, что на зависимости $K_{стU}$ от времени воздействия магнитного поля на воду, существует два участка «насыщения»: в начале воздействия и примерно через 40 минут после начала эксперимента, когда изменение $K_{стU}$ от времени воздействия магнитного поля чрезвычайно мало, при этом с ростом температуры интервал изменения $K_{стU}$ также уменьшается.

Интересно отметить что время возврата воды в состояние, характерное до начала воздействия, значительно больше, чем время выхода в состояние насыщения после начала воздействия. Эти результаты коррелируют с изменением $K_{стU}$, представленным на рис. 39.

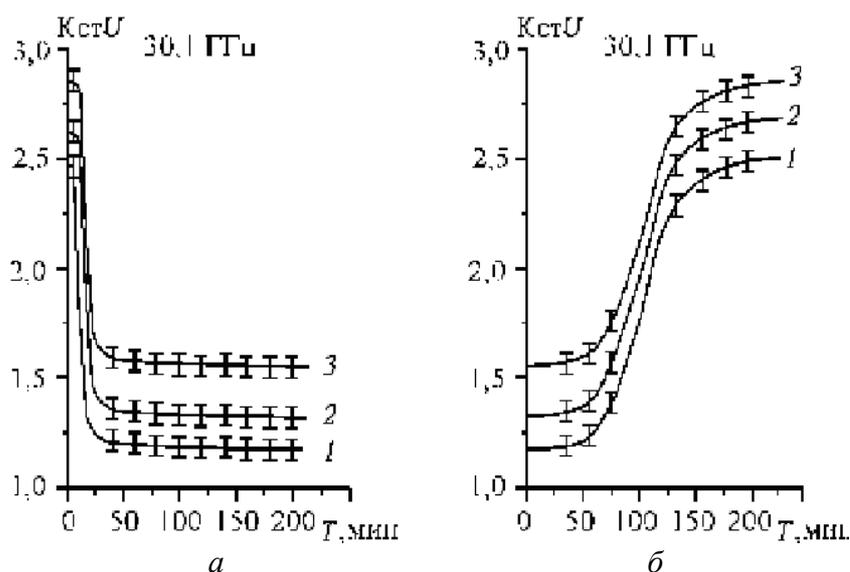


Рис. 39. Зависимость $K_{стU}$ от времени на частоте 27,1 ГГц при различных температурах «намагничиваемой» воды: 1 – 15°C, 2 – 25°C, 3 – 35°C

Были проведены измерения зависимости $K_{стU}$ от частоты переменного магнитного поля для двух значений его амплитуды. Результаты измере-

ний приведены на рис.40 (кривая 1 – величина индукции магнитного поля 150 Гс , кривая 2 – 50 Гс). При уменьшении величины магнитного поля, при одинаковых частотах и временах воздействия изменение $K_{ст}U$, а значит, и диэлектрической проницаемости воды уменьшается. Из этих результатов следует, что максимальное изменение $K_{ст}U$ в результате воздействия переменного магнитного поля происходит на частоте ~ 5 Гц, что хорошо согласуется с зависимостью влияния переменного магнитного поля на частоту сердцебиений дафнии. При этом для одинакового времени воздействия при меньших магнитных полях изменение $K_{ст}U$ меньше для всех частот. Изменений $K_{ст}U$ при "намагничивании" воды в пробирке, помещенной на открытое измерительное отверстие б когда измерительный резонатор имеет максимальную чувствительность к изменению проводимости, обнаружено не было.

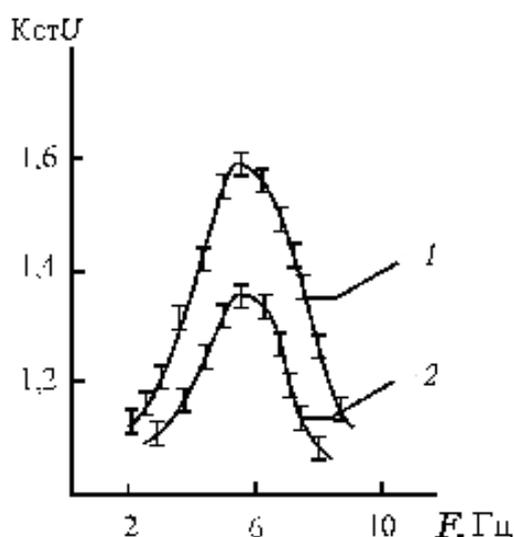


Рис. 40. Зависимость $K_{ст}U$ от частоты магнитного поля: 1 – 150 Гс, 2 – 50 Гс

Таким образом, можно сделать вывод о том, что воздействие переменного магнитного поля приводит к изменению, а именно к уменьшению диэлектрической проницаемости воды, как это следует из свойств резонатора [265], при этом с помощью использовавшейся системы изменения тангенса угла диэлектрических потерь обнаружить не удалось. Отметим, что количественное определение изменения характеристик воды СВЧ-методом при воздействии на нее магнитного поля можно получить при решении так называемой обратной задачи, позволяющей по характеристикам, описывающим взаимодействие СВЧ-колебания в электродинамической системе с «намагниченной» водой, определять значения параметров воды.

3. МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ НА ФИЗИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДЫ

Работы по изучению воздействия электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот низкой интенсивности на биологические объекты проводятся во многих научных центрах разных стран (в частности, в университетах Великобритании, Италии, Германии). Под излучением низкой интенсивности подразумевается такое, мощность которого не превышает 10 мВт/см^2 . В бывшем Советском Союзе и впоследствии в странах СНГ такого рода исследования проводились под руководством академика Н. Д. Девяткова в России и профессора С.П. Ситько на Украине; в Германии в работу включился институт им. М. Планка в Штутгарте, в Италии – ученые Миланского университета. Огромный вклад в осмысление полученных результатов внес Г. Фрелих.

Большой экспериментальный материал, полученный за последние годы, свидетельствует о том, что механизмы такого взаимодействия, как с отдельной живой клеткой, так и с организмом в целом, затрагивают фундаментальные аспекты жизнедеятельности. Следует отметить, что единого мнения о физических механизмах взаимодействия ТГц-волн с биологическими объектами не существует, так как неизвестно ключевое звено, связывающее метаболизм клетки с ЭМИ. Отметим, что в литературе, сравнительно редко встречается модельное представление эффекта воздействия излучения терагерцового диапазона на биообъекты [121,140].

Многочисленными биофизическими экспериментами с использованием экранированных камер подтверждена роль электромагнитного поля окружающей среды как одного из регулирующих факторов в процессе роста и развития многоклеточных организмов или колоний одноклеточных [141]. Однако такого рода эксперименты основываются на экспериментальном подборе условий эксперимента (частоты, мощности излучения, типа поляризации и др.) и зачастую ограничиваются констатацией факта влияния.

Получены экспериментальные данные о регистрации собственного излучения клетки в момент своего деления. Установлено, что в некоторых диапазонах длин волн живые клеточные системы реагируют на сигналы, интенсивности которых сравнимы с уровнями теплового фона и естественных флуктуаций. В экспериментах по изучению особенностей размножения одиночных клеток дрожжей в условиях электромагнитной изоляции показано, что межклеточные коммуникации, ответственные за макроскопическую когерентность колонии, имеют электромагнитную природу. Установлен факт влияния внешнего электромагнитного фона на динамику клеточного размножения в начальной стадии образования колонии [142].

Нельзя не отметить ряд работ, посвященных применению ЭМИ в биотехнологии. В настоящее время биотехнология относится к одному из трех наиболее перспективных научных направлений, которые определяют раз-

витие мировой экономики в XXI веке (к их числу относятся еще нанотехнология и электроника). В современном представлении биотехнология – это промышленное использование биологических процессов и агентов на основе получения высокоэффективных форм микроорганизмов, культур клеток и тканей растений и животных с заданными свойствами [141]. Первые попытки использования миллиметровых волн в биотехнологических процессах предпринимались достаточно давно, почти одновременно с первыми опытами применения этих волн в терапии, хотя для этого приходилось преодолевать ряд технических трудностей. Было установлено, что действие ЭМИ чрезвычайно зависит от параметров облучения. Например, в работе [141] экспериментально было установлено, что биотехнологический процесс – пивоварение, при воздействии ЭМИ на длине волны 6,036мм, идет с меньшей длительностью брожения дрожжей и меньшим количеством диацетила, а также характеризуется повышением питательных свойств пива.

В работах [143–145] изучалось влияние ЭМИ на частотах первой спектральной области поглощения излучения кислорода, характерного для КВЧ-диапазона, на клетки *E.coli*. В ходе исследований была обнаружена некоторая стимуляция роста клеток, на частотах 48; 49; 53 ГГц, а также установлено увеличение устойчивости клеток *E.coli* к дегидратации в среднем в 1,2 раза после воздействия излучения. Поскольку наличие кислорода является необходимым фактором роста культуры кишечной палочки, представляются интересными исследования воздействия на культуру *E.coli* ЭМИ на частотах второй спектральной области поглощения атмосферного кислорода ~129 ГГц [145–148].

Интересные исследования проводились по изучению влияния электромагнитного излучения КВЧ-диапазона на биолюминесценцию бактерий [149,150]. На светящихся морских бактериях *Photobacterium leiognathi* установлено, что после воздействия ЭМИ с длинами волн 6,96 и 4,16 мм и экспозицией в 10 минут происходит гашение биолюминесценции бактерий. Предполагают, что тушение биолюминесценции в первую очередь связано со структурными перестройками мембран клетки.

Таким образом, основным результатом подобных исследований по воздействию ЭМИ считается наличие или отсутствие биологического эффекта.

ЭМИ терагерцового диапазона частот разносторонним образом воздействует на целостный организм, и в первую очередь на процессы регуляции и поддержания гомеостаза. Реализация этого воздействия в значительной мере обеспечивается за счет субклеточных, клеточных и гуморальных механизмов регуляции функций и обусловлена рядом особенностей.

Одной из основных особенностей взаимодействия данного вида излучений с объектом-мишенью является его многоуровневый характер: эффекты воздействия проявляются на всех уровнях биологической организации организма, начиная с субмолекулярного. Уникальна еще одна особен-

ность взаимодействия указанного излучения с биологическим объектом. В то время как при воздействии практически всех факторов внешней среды на организм нарастание интенсивности воздействия сопровождается усилением отклонений параметров функциональной активности клеток, тканей, органов, систем от «физиологического» уровня, в механизме влияния ТГц-излучения на биообъекты уникальной особенностью является возможность их резонансного взаимодействия с биообъектом. Это явилось объективной предпосылкой для разработки методов использования данного вида излучения с целью направленной коррекции параметров гомеостаза организма независимо от отклонений, обусловленных патологией (повреждением). Возбуждение когерентных колебаний является природным механизмом саморегуляции клетки [151,152]. В «нормальном» (стационарном) состоянии клетки не генерируют когерентных колебаний в терагерцовом диапазоне частот. При изменении клеточного гомеостаза (переходе в нестационарное состояние) возбуждаются указанные колебания, которые, действуя по принципу механизма отрицательной обратной связи на нарушенные функции клетки, способствуют их восстановлению. При этом возбуждающиеся в клетке когерентные колебания в указанном диапазоне частот способствуют восстановлению именно тех структур, в которых произошли нарушения. Если по каким-либо причинам переход клетки из стационарного состояния в нестационарное не сопровождается генерированием когерентных колебаний, наложение внешнего ЭМИ ТГц-диапазона способно имитировать собственные колебания клетки, ускоряя процесс восстановления.

Таким образом, понятие «клеточные механизмы воздействия ТГц-волн на организм» объединяет совокупность изменения метаболизма, структуры и функций клеток под влиянием данного вида излучения и возможной роли указанных изменений в реакциях, реализуемых на клеточных и надклеточных уровнях.

В настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал, свидетельствующий о том, что ЭМИ ТГц-диапазона способно оказывать воздействие практически на все известные типы клеток (нервные, мышечные, соединительно-тканые, рецепторные и др.) в модельных системах любого уровня организации биологического объекта исследований (одиночные клетки, культура клеток, колонии микроорганизмов, культура ткани, изолированные органы, целостный организм).

Результаты экспериментально-теоретических исследований легли в основу новейших методик лечения: микроволновой резонансной терапии (МРТ), КВЧ-терапии, ТГц-терапии, нашедших широкое применение в клинической практике [153–155].

Накоплен обширный клинический и экспериментальный материал, свидетельствующий об изменениях иммунного статуса больных людей и экспериментальных животных после воздействия ЭМИ ТГц-диапазона низкой интенсивности, обусловленных изменением активности иммунокомпетентных клеток. Показано, что облучение крови язвенных больных

in vitro приводит к восстановлению сниженной метаболической активности лейкоцитов, фагоцитарной активности нейтрофилов и моноцитов [152]. В экспериментах на крысах получен новый эффект стимуляции лейкопоза под влиянием однократного 15-минутного воздействия. Стимуляция лейкопоза формируется в две фазы. Первая фаза характеризуется формированием в течение 48 часов нейтрофильного лейкопоза, который в интервале от 48 до 72 часов сменяется лимфоцитозом. В последующем наблюдается обратная динамика развития клеточного состава крови, и показатели лейкоформулы к 6-м суткам приходят в норму.

Показано положительное влияние ЭМИ на репулационный потенциал стволовых клеток, что особенно важно при решении проблемы повышения эффективности миелотерапии при заболеваниях кроветворной и иммунной систем человека, при лучевых поражениях, раке и других патологических состояниях, связанных с нарушением гемоиммунопоза [156–159].

Продемонстрировано, что электромагнитное излучение ТГц-диапазона с низкой интенсивностью снижает поглощение йода тиреоидной тканью. Это является экспериментальным обоснованием использования ЭМИ в комплексной терапии интоксикации радиоiodом в качестве радиопротекторного воздействия.

Первое место среди причин потери трудоспособности, инвалидности и смертности населения занимают заболевания сердечно-сосудистой системы. Не всегда достаточная эффективность и безвредность существующих методов лечения заставляет искать новые методы снижения сердечно-сосудистой заболеваемости. Таким новым эффективным методом является использование КВЧ- и ТГц-терапии, как монотерапии, так и компонента комплексной терапии.

Коррекция гормональной и медиаторной регуляции функций под влиянием ТГц-волн проявляется как в стимуляции, так и в ингибировании функциональной активности эндокринных желез, выхода медиаторов во внутреннюю среду организма и множестве других эффектов. Коррекция иммунных реакций под влиянием ЭМИ ТГц-диапазона также может носить различный характер (стимуляция или угнетение) в зависимости от того, какой тип влияния обеспечит нормализацию отклоненных параметров гомеостаза.

В то же время существует ряд работ, подтверждающих негативную роль воздействия ЭМИ ТГц-диапазона на жизнедеятельности биообъектов [160–165]. Например, в работе [164] при воздействии излучения на тонкую кожу мышей в условиях *in vitro* отмечали значительные ультраструктурные изменения клеток кожи, прежде всего формирование полостей диаметром 0,2–3 мкм. В работе [164] экспериментально показано, что эффект воздействия ЭМИ ТГц-диапазона зависит от ряда физических, физиологических и генетических параметров и не принятие их в расчет может привести к негативным результатам в репродуктивности биообъекта. При различных условиях экспозиции излучения возможно как увеличение, так и

уменьшение скорости роста дрожжевых клеток, радиационно-индуцированные повреждения мышей, дыхательный взрыв нейтрофилов мышей и конденсация ядер в клетках *E.coli*.

Можно утверждать, что накопленный к настоящему времени обширный фактический материал о различных сторонах влияния ЭМИ ТГц-диапазона на биологические объекты является основанием для дальнейшего расширения диапазона поисков его прикладного использования в медицинской практике. Однако без теоретического осмысления и построения общего подхода к применению ЭМИ ТГц-диапазона не представляется безопасным, поскольку до настоящего времени не выявлен общий или универсальный механизм воздействия такого излучения на биологический объект. Однако уже сейчас можно утверждать, что первичные эффекты касаются наиболее фундаментальных, общих для клеток организмов процессов метаболизма, лежащих в основе жизнедеятельности – фотосинтеза, тканевого дыхания, механизмов электронного переноса и др.

3.1. Панорамно-спектрометрический комплекс

Теоретические и экспериментальные исследования последнего десятилетия по физике взаимодействия ЭМИ ТГц-диапазона с биологическими и физическими средами [201–204] показали, что эффекты взаимодействия зависят от структуры электромагнитного поля, спектрально-молекулярных свойств окружающей среды (атмосферного воздуха, газов, аэрозолей и т.д.), от фазы молекулярного развития исследуемой биологической среды [202] или структурно-молекулярного состояния физической среды [203].

При исследовании взаимодействия ТГц-поля со средами с помощью стандартных прямоугольных волноводов, работающих на основной волне H_{10} и на волне E_{11} с заданной поляризацией, экспериментаторы сталкиваются с проблемой чувствительности приемников при измерении параметров среды (например, по отраженной, поглощаемой и прошедшей через среду мощности). Это связано с тем, что структура молекулярных спектров излучения и поглощения сред имеет в своем составе различные типы колебаний и поляризации [205–207]. Для повышения эффективности взаимодействия среды и поля целесообразно использовать многомодовые волноводящие структуры, например, квазиоптический тракт [120,208].

Возбуждая молекулярный атмосферный газ, например кислород, на частотах в диапазонах 55–63 ГГц, 121–130 ГГц или его соединения с азотом на частотах 149–152 ГГц, можно обеспечить управление его реакционной способностью в процессе взаимодействия атмосферного воздуха со средами [209]. Дыхание живых объектов атмосферным воздухом, в котором составляющие его молекулы возбуждены ТГц-полем, является одним из механизмов коррекции их физического состояния [121,122,201,210].

Необходимость в использовании такого генератора также возникает при исследовании взаимодействия ТГц-поля с биосредами. Экспериментально установлена зависимость эффективности воздействия на клетки

E.coli и тимоцитов крыс Вистара волн, имеющих различную поляризацию (левую круговую или правую круговую), структуру ТГц-спектров и точность установки частоты, параметры модуляции, уровни мощности, время воздействия и др. [202]. Экспериментально установлено, что наибольший эффект взаимодействия между полем и бактериями, имеющими форму «нитей», возникает, когда поляризация вектора E обеспечивает его направление вдоль бактерии.

Таким образом, создаваемый генератор должен обеспечивать следующие характеристики ТГц-поля, от которых зависят эффекты взаимодействия электромагнитного излучения со средами [204–213]:

- необходимую величину плотности мощности [214];
- ориентацию векторов E и H относительно структур биосреды [204,206];
- направление круговой поляризации (левое, правое) [202];
- фазовые и амплитудные флуктуации поля [204];
- спектральный состав сигнала ТГц [203,214];
- точность установки частоты сигнала [204,214];
- время воздействия поля ТГц на среду [204,214];
- типы колебаний поля ТГц [204];
- структуру импульсной и частотной модуляции [204,214].

Для формирования ТГц-поля, отвечающего этим требованиям, необходимо использовать многомодовые линии передачи и преобразователи структуры поля.

Наиболее удобной линией передачи для формирования поля с указанными свойствами является квазиоптическая линия передачи и выполненные на ее основе квазиоптические узлы, обеспечивающие управление структурой облучающего поля.

Для исследования взаимодействия физических и биологических сред с полями различной структуры (поляризация векторов E , H , плоскости поляризации, закон изменения частоты, режимы амплитудной модуляции, мощность излучения, время облучения среды и т.д.) был разработан квазиоптический панорамно-спектрометрический комплекс с программируемым ТГц-генератором, работающим в диапазоне частот молекулярных спектров газов атмосферного воздуха [120,215]. Блок-схема и общий вид комплекса показаны на рис. 41 и 42.

Для имитации излучения молекулярных спектров атмосферных газов на выходе генератора должна формироваться средняя по всем поляризациям мощность P_{xyz} , определяемая выражением [206,216–220]:

$$P_{xyz} = mhf_n \omega_{xyz},$$

где m – количество квантов в заданном объеме атмосферного воздуха; h – постоянная Планка; f_n – частоты молекулярных спектров атмосферных газов, $n=1,2,3\dots$; ω_{xyz} – вероятность излучения молекулой квантов энергии за секунду с заданными типом колебаний и поляризаций.

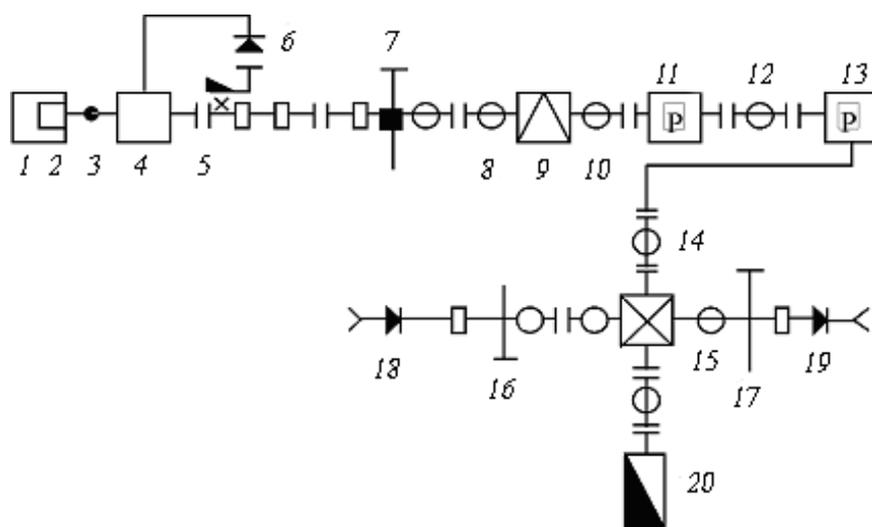


Рис. 41. Квазиоптический панорамно-спектрометрический комплекс: 1– компьютер; 2– контроллер КОП IEEE 488; 3– коннектор E 162690-AWM2651; 4– генераторы качающейся частоты (ГКЧ) 170–270 ГГц, 118–170 ГГц, 78–118 ГГц, 53,7–78 ГГц; 5– направленный ответвитель ГКЧ; 6,18,19– детекторная головка в диапазонах 53,7–270 ГГц; 7– возбуждители типов волн и поляризации; 8, 10, 12, 14– лучевод 3.569.362; 9– модулятор 3.541.520; 11– поляризатор 3.680.032; 13– вращатель плоскости поляризации 3.567.055; 15– направленный ответвитель 3.587.010; 16, 17– волноводно-лучевые переходы 3.562.623-01÷04; 20– нагрузка согласованная 3.580.126

Если молекулярный спектр конкретного газа имеет n линий (частот), то в соответствии с [206] распределение этих частот во времени может быть, например, пуассоновским. В то же время закон распределения частот молекулярных спектров в терагерцовом диапазоне частот излучения и поглощения может быть выбран в зависимости от задач эксперимента. Например, для создания сигнала со спектром низкочастотных флуктуаций « $1/f$ » требуется гауссовское распределение амплитуд в спектре. Значение m , а следовательно, мощности излучения генератора зависит от температуры, давления, скорости потока и объема возбуждаемого атмосферного воздуха и регулируется с помощью специальной квазиоптической системы. Основным требованием к комплексу являлось формирование на выходе спектра частот, характерных для поглощения-излучения вещества, с одновременной регулировкой мощности, типа колебаний и поляризации излучения.

В качестве источника ТГц-мощности использовались программируемые генераторы качающейся частоты (ГКЧ) типа Г4-161 с волноводными выходами сечений 3,6x1,8; 2,4x1,2; 1,1x0,55 мм, перекрывающих диапазон частот 53,7–270 ГГц. Управление ГКЧ осуществлялось с помощью компьютера через контроллер КОП IEEE 488. Для стабилизации мощности на выходе использовался направленный ответвитель 5 (см. рис. 41) и детектор 6, выполненные в волноводных каналах соответствующих частот. Квазиоптический тракт (табл. 7) состоял из возбуждателей типов волн соответст-

вующей поляризации 7 и волноводно-лучевых переходов 16,17, амплитудного модулятора 9, соединенного с лучеводом 8 и поляризатором 11 через лучеводы 8 и 10. Выход поляризатора 11 соединялся с вращателем плоскости поляризации 13, подключенным через лучевод 14 к квазиоптическому рефлектометру 15. Плечи рефлектометра соединялись через волноводно-лучевые переходы 17 и 16 с детекторами 18 и 19 соответственно. Одно из плеч рефлектометра было нагружено на квазиоптическую нагрузку 20. Детекторные головки 18 и 19 подключались к анализатору спектра типа, например, СК4-97, СК4-56 при работе генератора в режиме амплитудной модуляции ГКЧ или модулятора 9. Закон распределения частот и уровня мощности в спектре излучения генератора устанавливались с помощью компьютера и специально разработанной программы.

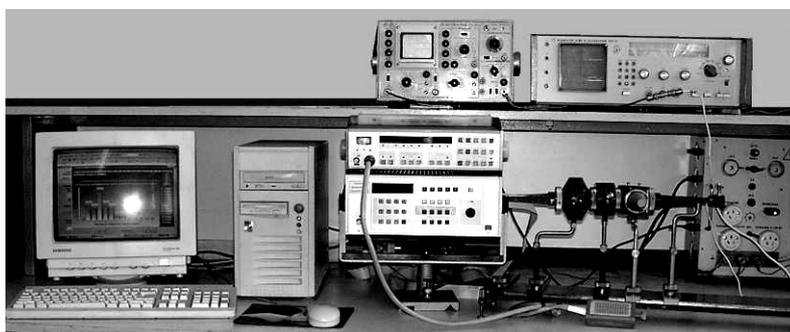


Рис. 42. Общий вид квазиоптического измерительного комплекса

В качестве возбуждателей 7 в квазиоптическом полом диэлектрическом волноводе 8 типов волн и поляризаций использовался преобразователь поляризации и трансформатор типов волн. ТГц-поле с круговой поляризацией можно получить, используя технику разделения полей в пространстве или во времени. Поворот плоскости поляризации волн E или H в прямоугольном волноводе может быть получен путем плавного скручивания волновода. Если в прямоугольном или круглом волноводе распространяются две взаимно перпендикулярные идентичные по амплитуде волны со сдвигом на 90^0 во времени, то результирующая ТГц-волна будет поляризована по кругу, при этом вектора E и H будут вращаться с заданной генератором частотой [217]. Линейно поляризованная волна может быть преобразована в поляризованную по кругу с помощью поляризатора, например, ромбического волновода с длиной, обеспечивающей разность фаз между двумя взаимно перпендикулярными модами, распространяющимися в ромбическом волноводе с разными скоростями, равную 90^0 . Другой способ получения волн с круговой поляризацией заключается в том, что используют прямую и отраженную от короткозамыкателя волны, сдвинутые на четверть длины волны с помощью проводящей пластины, находящейся на расстоянии $\lambda/4$ от короткозамыкателя в волноводе [218].

Таблица 7. Параметры изготовленных в ОАО ЦНИИИА квазиоптических узлов, входящих в КВЧ-тракт комплекса

Наименование узла	Рабочий диапазон частот, ГГц	Параметры
Направленный ответвитель Рефлектометр 3.587.010	118–600	Переходное ослабл. 20 дБ Направлен. 40 дБ
Поляризационный аттенюатор 3.564.486	118–600	Ослабление 0–25дБ КСВН 1,15
Лучевод 3.569.362	118–3000	Затухание 0,1–4дБ/м
Поляризатор 3.680.032	118–600	Ослабление 23 дБ Ослабление сигнала полезной поляриз. 0,3 дБ
Модулятор 3.541.520	118–600	Частота модуляции 10–1500 Гц Глубина модуляции 90%
Комплект волноводно-лучевых переходов 3.562.623	118–600	Затухание 1,6-3,5 дБ, КСВН=1,2
Согласованная нагрузка	118–600	КСВН≤1,05
Комплект детекторных головок в волноводных каналах, перекрывающих заданный частотный диапазон	53,7–270	Чувствит. 600 В/Вт КСВН≤2,5
Вращатель плоскости поляризации 3.567.055	118–600	Диапазон регулировки плоскости поляризации 0–360 ⁰ Ослабление 0,7–1,5 дБ

Квазиоптическая линия передачи представляла собой полый диэлектрический лучевод (рис. 43) с внутренним диаметром, значительно большим длины волны. Поле в поперечном сечении воздушного канала максимально на оси и спадает до уровня, близкого к нулю, на границе раздела воздух-диэлектрик. Конструктивно лучевод представлял собой цилиндрическую трубку из фенoplastа ($\epsilon=2,3$), с внутренним диаметром $2a=20$ мм, толщиной 5 мм, помещенную в экранирующую металлическую трубу с фланцами. Для обеспечения повышенной фильтрации волн побочных типов использовались внутренние продольные ребра $h<\lambda$, $L<\lambda$ треугольного сечения. Полый диэлектрический лучевод имеет существенные преимущества перед известными линиями передачи ввиду присущей ему совокупности положительных качеств: отсутствия периодичностей, относительно высокой степени подавления побочных типов волн, близкого к плоскому фазового фронта волны с минимальным затуханием. Диапазон частот лучевода – 53,7 – 600 ГГц. Затухание в диапазоне от 53,7 до 118 ГГц уменьшается пропорционально f^2 . Квазиоптическая лучеводная линия передачи с набором функциональных узлов позволяет осуществлять построение са-

мых разнообразных измерительных схем, в том числе предназначенных для использования при диагностике газоразрядной плазмы, измерении параметров диэлектриков и полупроводников, контроле биологических сред, а также в радиоастрономии и радиолокации.

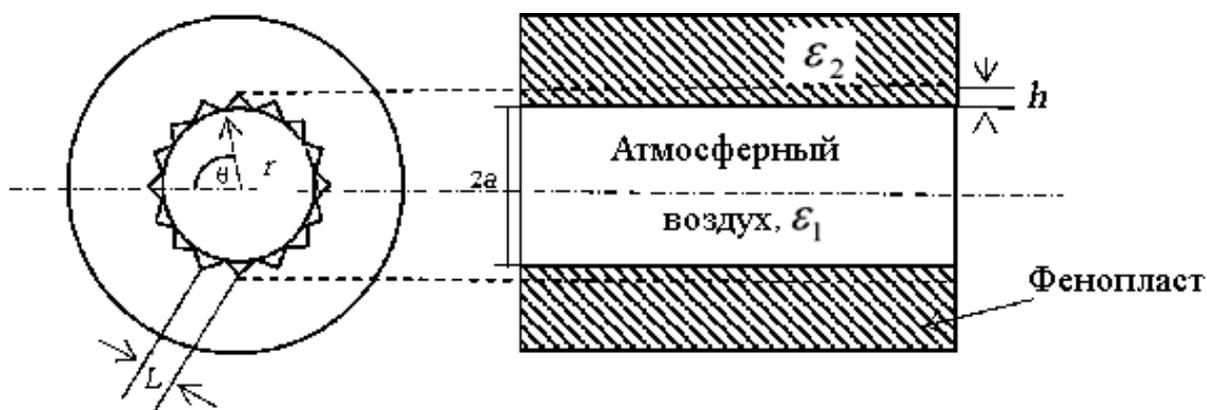


Рис. 43. Квазиоптический диэлектрический волновод

Следует отметить ряд важных свойств квазиоптического тракта, работающего в ТГц-диапазоне. В нем распространяются типы колебаний TE_{0m} , TM_{0m} , EH_{nm} .

Исследуемый объект помещается вместо нагрузки 20 или непосредственно в квазиоптическую нагрузку 20 (см. рис.41) [203,204]. При исследовании биологических и физических сред в виде плоского капилляра его помещают в квазиоптический рефлектор (направленный ответвитель 15), с помощью которого можно измерять падающую, отраженную и прошедшую через среду мощность с использованием детекторов 18 и 19. При изменении поляризации сигнала можно изменять положение детектора с помощью вращающегося сочленения. Ручное управление поляризацией или плоскостью поляризации сигнала, падающего на исследуемый объект, обеспечивается поляризаторами 11, 13, параметры которых указаны в табл. 7, а также пространственным расположением объекта исследования. Структура поля в квазиоптическом тракте формируется возбудителем 7.

Для формирования сигнала фрактального распределения ГКЧ включается в режим непрерывной генерации на фиксированной частоте, выбранной для проведения эксперимента. При этом спектральная плотность $P(f)$ низкочастотных флуктуаций ГКЧ может быть представлена выражением [204,220]:

$$P(f) = \frac{1}{f^n},$$

где показатель степени n изменяется в пределах от 0,8 до 1,5.

Этот сигнал выделяется в соответствии с блок-схемой для измерения фазовых флуктуаций [205,219] с использованием детектора, полосового фильтра и усилителя низкой частоты. Полоса фильтра выбирается в зависимости от типа используемого источника СВЧ- сигнала в ГКЧ (ЛОВ, диод Ганна, клистрон), для которых спектр фазовых флуктуаций с фрактальным

распределением, а следовательно, и полоса фильтра находятся при отстройке от несущей частоты от десятков герц до 3 кГц (клистрон), 100 кГц (ЛОВ), 300 кГц (диод Ганна) [220].

3.2. Программное обеспечение для управления выходным спектром генератора

Решение задачи автоматизации экспериментов существенно упрощается при использовании средств вычислительной техники, с помощью которых возможно выполнение наиболее сложных и трудоемких функций системы, включающей в себя сбор информации с аналогово-цифровых преобразователей сигналов, нормировка сигналов, синхронизацию, графическое отображение сигналов в режиме реального времени и автосохранение полученной информации.

При разработке программного обеспечения экспериментального образца данной системы предпочтение было отдано традиционным методикам разработки приложений WINDOWS в среде DELPHI, которые вполне доступны пользователю-экспериментатору. Работа в среде DELPHI позволила в ходе эксперимента оперативно модифицировать программу и интерфейс пользователя в соответствии с задачами, возникающими в процессе отработки новых методик и адаптации программы к новым объектам исследования.

В основу разработки программы был положен модульный принцип. Программа пользователя представляла собой набор программных модулей, написанных на языке OBJECT PASCAL и оформленных в среде DELPHI версии 5.0 в виде приложений, работающих под управлением операционной системы WINDOWS.

Обмен данными осуществляется с помощью драйвера KOP.BIN, который поддерживает стандартный протокол обмена канала общего пользования в соответствии с требованиями ГОСТ 26.003-80 (СТ. СЭВ 2740-80).

В состав технических средств исследовательского комплекса входил IBM-совместимый персональный компьютер с процессором PENTIUM-III.

Для осуществления обмена информацией в состав технических средств комплекса входила также плата контроллера КОП фирмы «Сигнал» – модель КОП (IEEE488). Плата устанавливалась непосредственно в IBM PC в свободный слот шины ISA.

Основной модуль рабочей программы поддерживал автоматическое выполнение всех функций ГКЧ, приведенных в разделе «Технические характеристики квазиоптического генератора».

Кроме того, программа позволяла оператору:

- устанавливать любые дискретные значения частоты в пределах рабочего диапазона генератора, что необходимо при калибровке генератора по частотомеру;

- управлять запуском автоматического цикла (сеанса) и осуществлять при необходимости его экстренную остановку;
- инициировать процедуры распечатки на принтере графиков и карты параметров проведенного эксперимента или сеанса.

Модуль обеспечивает индикацию прохождения автоматических процессов и результаты их выполнения. По завершению сеанса выдается сообщение оператору и звуковой сигнал.

Специальной функцией программы является моделирование регулярного потока случайных событий, распределенных по заданному закону (Пуассона, Гаусса и фрактального $1/f$).

При проведении экспериментов со сложными биологическими системами такими событиями являются частоты молекулярных спектров поглощения и излучения атмосферных газов, воспроизводимые программируемым генератором.

Программа обеспечивала генерацию указанных потоков, оперативное управление основным параметром распределения (математическое ожидание), а также статистический анализ совокупности генерируемых частот с целью проверки адекватности их распределения заданному закону.

Пример гистограммы случайной выборки при математическом ожидании, равном трем, полученной по результатам сеанса длительностью 5 минут, представлен на рис. 44 (закон Пуассона).

Проверка гипотезы о принадлежности этой случайной выборки генеральной совокупности распределения Пуассона, выполненной с использованием критерия Колмогорова, подтверждает достоверность гипотезы при данном объеме выборки.

Рабочая программа представляет собой пакет, состоящий из загрузочного модуля приложения WINDOWS, драйвера платы контроллера канала общего пользования и файлов инициализации, в которых записаны используемые по умолчанию параметры генератора, номиналы частот заданных спектров газов и параметры эксперимента.



Рис. 44. Гистограмма случайной выборки распределения Пуассона

Номиналы частот спектров содержатся в текстовых файлах Spectr_N.txt и Spectr_O.txt, входящих в состав пакета. Их можно изменить либо уточнить, отредактировав эти файлы в системном редакторе текста.

Разработанная программа автоматизации экспериментов при проведении исследований взаимодействия ТГц-полей и сред позволяет повысить производительность методик исследования и объективность полученных результатов.

Возможность накопления, систематизации и оперативного использования полученных данных, обеспечиваемая использованием средств вычислительной техники, должна способствовать повышению эффективности исследований и ускорению внедрения их результатов в практику.

Технические характеристики квазиоптического панорамно-спектрометрического комплекса, работающего в диапазоне молекулярных спектров излучения атмосферных газов

- Рабочий диапазон частот генераторов, ГГц	53,7–270
- Погрешность измерения мощности прибором МЗ-75, %	6÷15
- Рабочий диапазон частот квазиоптического тракта, (в диапазоне от 53,7 до 118 ГГц затухание уменьшается пропорционально f^{-2}), ГГц	53,7–600
- Возбуждаемые типы волн	<i>TM_{0m}, TE_{0m}, EH_{nm}</i>
- Поляризация линейная волн E и H, °	0÷90
- Коэффициент эллиптичности преобразования поляризации волн E и H из линейной в правую (левую) круговую	0,95
- Вращение плоскости поляризации, °	0–360
- Точность определения частоты в тракте	10^{-3}
- Пределы регулировки мощности, дБ	0-25
- Спектральный состав КВЧ-сигнала определяется на частоте амплитудной модуляции с помощью анализатора спектра СК4-56 (СК4-97) и квазиоптического волномера:	±0,5
с чувствительностью, Вт	10^{-13}
с точностью определения частот компонент спектра	10^{-3}
с погрешностью определения относительных амплитуд компонент спектра различных поляризаций, дБ	±0,5
- Динамический диапазон измерения амплитуд спектра, дБ	80
- Чувствительность измерения амплитудных и фазовых флуктуаций «1/f» на частоте отстройки 10 кГц, минус дБ/Гц	120
-Изменение поляризации приема сигнала детекторных головок, °	0–360
Автоматическое выполнение следующих функций:	
формирование массивов частот и амплитуд молекулярных спектров газов атмосферы по законам Пуассона, Гаусса, фрактальному «1/f»	
- управление выходной мощностью генератора, дБ	0–25
- задание времени эксперимента, с	$3 \cdot 10^2 - 3,6 \cdot 10^3$
- управление частотой амплитудной модуляции, Гц	10÷105

Разработанный квазиоптический панорамно-спектрометрический комплекс ТГц-диапазона, кроме перечисленных выше применений для исследований воздействия ТГц-волн на биологические среды, может быть использован для разработки систем радиолокации и связи военного и народнохозяйственного назначения, изучения законов распространения миллиметровых волн различных типов, поляризации и структур спектров в земной атмосфере, определения полос поглощения и «окон прозрачности», обусловленных наличием различных газов в атмосфере и других средах.

3.3. Квазиоптические устройства для исследований воздействия на биосреды

Для исследования биологических и физических сред применялись полый металлодиэлектрический лучевод, согласующие трансформаторы, согласованные нагрузки, рефлектометры и другие узлы, входящие в состав панорамного квазиоптического комплекса, параметры которых приведены в [220]. Дополнительно были разработаны контактные устройства на основе квазиоптической нагрузки и делителя луча (рефлектометра), в которые помещалась исследуемая среда. С помощью таких контактных устройств в работе исследовались тромбоцитарная плазма, эритроциты, бактерии кишечной палочки. Использование специальной рупорной антенны позволило исследовать влияние ЭМИ на дафнию в водной среде.

3.3.1. Рупорная антенна

Существенным недостатком волноводных излучателей является плохое согласование их со свободным пространством (коэффициент отражения достигает больших значений) [218, 221]. Для сужения диаграммы направленности и улучшения согласования можно плавно увеличивать сечение волновода, т.е. переходить к рупорным антеннам.

Экспериментально установлено, что наибольший эффект взаимодействия биообъекта в движении и электромагнитного излучения можно достичь, используя круговую поляризацию. Для того чтобы на выходе рупорной антенны получить излучение круговой поляризации, необходимо обеспечить разные фазовые скорости волн H_{10} и H_{01} со сдвигом фаз $\Delta\varphi = (2n+1) \cdot \frac{\pi}{2}$. Это возможно при выполнении следующего соотношения:

$$L = \frac{(2n+1) \cdot \lambda}{4 \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2b}\right)^2} \right]},$$

где L – длина рупорной антенны,

λ – рабочая длина волны,

a, b – соответственно ширина и высота раскрыва рупора,

$n = 1, 2, \dots$

Для длины волны $\lambda=2,32$ мм, соответствующей частоте поглощения кислорода – 129ГГц, и при значениях $b=8,8$ мм, $L=115$ мм, которые заданы конструктивными особенностями квазиоптического тракта, рассчитанное значение a составляет 10,8 мм. Коэффициент эллиптичности круговой поляризации изготовленной рупорной антенны по результатам измерения составил 0,95. На рис. 45 приведена схема такой антенны.

Пирамидальный переход 5 изготовлен путем гальванического наращивания меди на серебряной подложке на шлифованной оправке из нержавеющей стали.

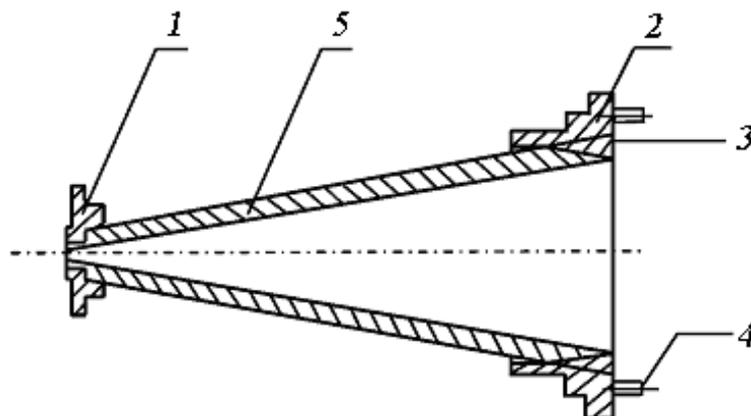


Рис. 45. Конструкция волноводно-лучевого перехода
1 – нормальный фланец; 2 – стандартный фланец;
3 – поглощающий материал; 4 – штифты;
5 – пирамидальный переход

Экспериментально была измерена плотность мощности на выходе такой рупорной антенны на различном расстоянии от рупора (табл. 8).

Таблица 8. Зависимость плотности мощности η рупорной антенны от расстояния l^*

l , см	0	5	10	15	20	25
η , мВт/см ²						
для частоты 151 ГГц	0,557	0,28	0,07	0,03	0,02	0,01
для частоты 130 ГГц	1,2	0,6	0,15	0,07	0,5	0,25

*Погрешность в измерении плотности мощности составляла 20%.

3.3.2. Делитель луча

При разработке терагерцовых делителей мощности для диапазона длин волн до 300 мкм и короче возникает необходимость в создании делителя с юстируемым делящим элементом. Это в основном обусловлено уменьшением направляющего влияния лучевода на волновой пучок при укорочении длины волны.

На рис.46 представлена конструкция делителя [222] луча, который содержит корпус, выполненный в виде четырехплечного прямоугольного лучеводного разветвления 1, и юстируемую кассету 2 с делящим элементом, размещенную в пазе корпуса.

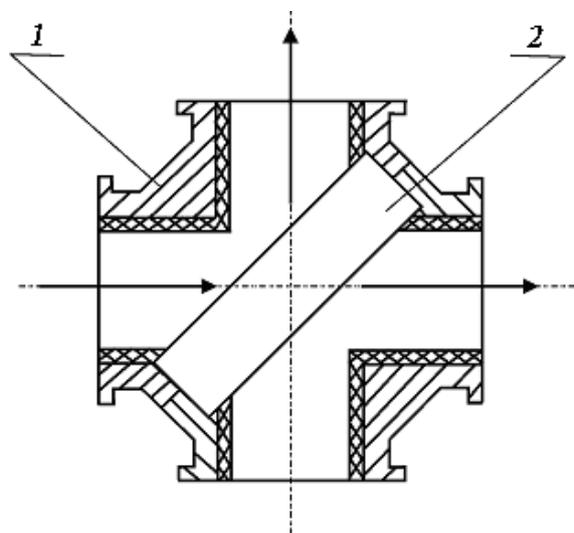


Рис. 46. Делитель луча: 1 – лучеводное разветвление; 2 – кассета

Если электромагнитная волна падает под углом 45° на диэлектрическую пластину, то ее энергия делится на две части: одна часть проходит прямо, а другая отражается под прямым углом к направлению падающей волны (см. рис. 46). Коэффициент отражения тонкой диэлектрической пластинки r , как известно, определяется величиной диэлектрической проницаемости ε материала [223]. Для пластины, расположенной под углом 45° к направлению распространения электромагнитной волны, он может быть найден из соотношения:

$$r = k \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1},$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Используя в качестве диэлектрической пластины материал с неизвестной ε , можно будет определить коэффициенты поглощения и отражения излучения. Для проведения таких исследований на различных средах была разработана специальная кассета из двух тонких (толщиной $\sim 0,01$ мм) полипропиленовых стенок, между которыми можно было располагать исследуемую среду. В собранном виде общая толщина кюветы составляет величину, кратную половине рабочей длины волны, что позволяет устранить паразитные переотражения от торцевых граней. Потери мощности при прохождении ЭМИ через пустую кассету в диапазоне от 100 до 200 ГГц составили 0,5–1 дБ. В [221] описано использование аналогичных устройств, в результате чего были получены интересные результаты при исследовании спектров поглощения живого листа растения.

3.3.3. Экранированная согласующая нагрузка

Экранированная согласующая нагрузка предназначена для поглощения всей поступающей по лучеводу мощности. Основными требованиями к таким нагрузкам являются наличие у них малого коэффициента отражения и достаточной энергоемкости. В качестве поглотителя электромагнитной энергии луча в оконечной согласованной нагрузке используют диэлектрик с большим тангенсом угла потерь. Для широкого класса твердотельных диэлектриков с большим $\operatorname{tg}\sigma$ диэлектрическая постоянная $\epsilon \geq 3$ [223]. В этом случае отражается $\geq 7\%$ падающего электромагнитного излучения. Отражение можно снизить путем придания поверхности диэлектрика определенного профиля и получить оконечные нагрузки с КСВН порядка 1,05 [224].

Для исследований влияния ЭМИ ТГц-диапазона на среды была разработана согласующая оконечная нагрузка, где в качестве поглотителя был применен диэлектрический полый конус с малым углом раскрыва (рис. 47). Внутри такого конуса, размеры которого значительно больше длины волны падающего электромагнитного излучения, распространяется линейно-поляризованная волна, волновой вектор которой параллелен оси конуса. В этом случае падающее электромагнитное излучение можно представить в виде пучка лучей, параллельных оси конуса. Предположим, что внутренняя поверхность конуса зеркально отражающая, и каждый луч пучка, последовательно отражаясь в диаметральной плоскости, претерпевает несколько отражений. При каждом отражении луч теряет определенную долю энергии и эффективный коэффициент отражения такого луча равен произведению коэффициентов отдельных отражений.

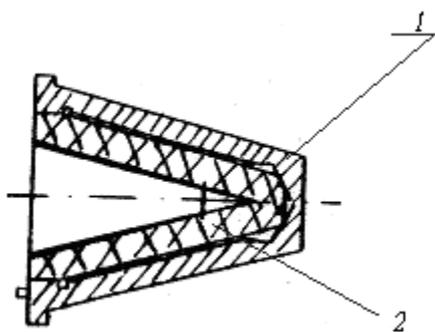


Рис. 47. Согласующая нагрузка: 1 – металлический экран, 2 – диэлектрик

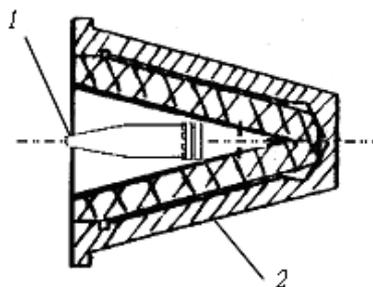


Рис. 48. Нагрузка с колбой Эпиндорфа: 1 – колба Эпиндорфа, 2 – нагрузка

Поглотитель излучения этой нагрузки представляет собой диэлектрический полый конус из пресс-порошка К-18-2 с углом раскрыва $\alpha = 30^\circ$. Диаметр конуса в основании 20 мм, длина 45 мм.

Нагрузка позволяла размещать во внутренней части диэлектрического поглотителя стандартную колбу Эпиндорфа (рис.48).

В качестве материала колбы использовался полипропилен. Подобно большинству синтетических полимеров полипропилен является диэлектриком с диэлектрической проницаемостью порядка 2, которая практически не зависит от температуры и частоты излучения. Экспериментально был определен КСВН нагрузки с пустой колбой Эпиндорфа, который оказался равен 1,35. Безусловно, наличие в колбе любых сред вносило небольшое рассогласование, таким образом, КСВН нагрузки с колбой, заполненной дистиллированной водой, составил 1,67. Однако следует отметить, что поглощательная способность материала колбы и ее геометрия наилучшим образом подходили для исследования воздействия электромагнитного излучения в экранированном квазиоптическом тракте на различные среды.

4. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ НА ФОРМЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КРОВИ

4.1. Исследование изменений функциональной активности тромбоцитов при воздействии электромагнитного излучения на частотах спектра газов - метаболитов

В качестве объекта для исследования воздействия излучения были выбраны тромбоциты больных стенокардией, так как известно, что тромбоциты человека являются удобной моделью для изучения обмена биологически активных веществ. Другой причиной выбора объекта послужило одно из положений КВЧ-терапии, состоящее в том, что организм относительно здорового человека менее чувствителен к КВЧ-воздействию, нежели организм больного. Также ранее экспериментально было выявлено, что тромбоциты достаточно выражено реагируют на внешнее воздействие ЭМИ. Вместе с тем показано, что КВЧ-воздействие на частотах (42,2 и 53,5 ГГц) обладает выраженным воздействием на мембраны клеток, стимулирует перемешивание ее липидных слоев и белковых компонентов [225]. Существуют данные о способности КВЧ-волн вызывать изменения гидратации белковых структур мембранных рецепторов [225]. В [226] показано умеренное ингибирующее влияние КВЧ-облучения на функциональную активность (активацию и агрегацию) тромбоцитов в условиях *in vitro*.

В настоящее время существует ряд работ, посвященных изучению роли обмена NO и связанных с ним метаболитов в регуляции функциональной активности кровяных пластинок – тромбоцитов, поэтому главной причиной выбора данного объекта и частоты послужило активное участие оксида азота в функциональной активности тромбоцитов. Поскольку, как уже ранее отмечалось, реакционная способность молекул выше в ТГц-диапазоне, то ожидается более выраженная реакция на электромагнитное воздействие нежели это описано в работах [226, 227].

Известно, что молекула NO является нейротрансмиттером, мощным фактором гемостаза, ингибитором агрегации тромбоцитов, эндогенным вазодилататором, проникающая непосредственно в клетку, а также является стартовой молекулой, включающей биохимические реакции [228].

4.2. Исследование влияния электромагнитного излучения на частотах спектра поглощения газа-метаболита – оксида азота на функциональную активность эритроцитов

В качестве объекта для изучения биологических эффектов воздействия ТГц-излучения на частотах молекулярного спектра оксида азота (NO) были выбраны тромбоциты 48 больных нестабильной стенокардией. В проведенных исследованиях изучалась функциональная активность кровяных пластинок – их активация и агрегация.

Забор крови производился в течение первых 6 часов после поступления больного в стационар, до начала специфической терапии. В исследовании не включались больные, имевшие тяжелые сопутствующие заболевания (печеночную недостаточность, сахарный диабет в стадии обострения и т.д.), а также больные с острым инфарктом миокарда.

Эксперименты по изучению взаимодействия излучения и обогащенной тромбоцитарной плазмы (ОТП) на частотах молекулярного спектра оксида азота (150,176–150,644 ГГц) проводились на панорамно-спектрометрическом измерительном комплексе с квазиоптическим рефлектометром со специальной кассетой. С помощью комплекса проводилось формирование облучающего электромагнитного поля, имитирующего молекулярный спектр излучения оксида азота, а также измерение спектра поглощения тромбоцитов. Эффективность взаимодействия между электромагнитным полем и биосредой на частотах молекулярного спектра NO определялась путем измерения коэффициента отражения от среды в частотном диапазоне 118–160 ГГц при различных поляризациях векторов E и H [229]. Все исследования проводились с применением экранированного квазиоптического тракта.

Продолжительность облучения составляла 5, 15 и 30 минут при постоянной мощности облучения ($10\text{--}4 \text{ Вт/см}^2$) в режиме непрерывной генерации.

Активацию и агрегацию тромбоцитов определяли методом, описанным в работе [230], при помощи лазерного анализатора агрегации «BIO LA». В качестве контрольной использовалась плазма тех же больных нестабильной стенокардией, но не подвергшаяся облучению.

В результате проведенных исследований обнаружено поглощение биосредой (обогащенной тромбоцитами плазмой) электромагнитного излучения в некоторых участках терагерцового диапазона, в том числе и на частотах молекулярного спектра поглощения и излучения оксида азота (149,5–151 ГГц). На этих частотах измеренный коэффициент стоячей волны (КСВН) при возбуждении в лучевом волне с круговой поляризацией вектора E составил 1,06, что свидетельствует о поглощении ЭМИ биосредой.

Установлено, что 5-, 10-, 15-, 30-минутное воздействие ЭМИ на частотах молекулярных спектров поглощения и излучения оксида азота в режиме непрерывной генерации в условиях *in vitro* вызывает по сравнению с контролем угнетение функциональной активности тромбоцитов. Это сопровождается снижением активации кровяных пластинок и падением их способности к агрегации.

Уменьшение активации тромбоцитов проявляется в снижении степени агрегации независимо от режима облучения. Угнетение агрегационной способности кровяных пластинок сопровождалось уменьшением таких показателей агрегатограммы, как степень агрегации, скорость образования агрегатов и увеличением времени достижения образования максимального размера агрегатов. По остальным показателям, характеризующим способ-

ность тромбоцитов к агрегации, не было выявлено статистически достоверных сдвигов по сравнению с данными контрольных исследований.

Не обнаружено статистически достоверной разницы в показателях агрегатограмм в зависимости от режима амплитудной модуляции электромагнитных колебаний, что свидетельствует об одинаковом эффекте амплитудно-модулированного и непрерывного режимов облучения на процесс активации и агрегации тромбоцитов.

Угнетение функциональной активности тромбоцитов (агрегация) под влиянием воздействия электромагнитного излучения на частотах молекулярного спектра оксида азота может быть обусловлено несколькими факторами.

Так, механизм взаимодействия ТГц-волн в диапазоне частот 150,176÷150,644 ГГц с биообъектом (плазмой крови) можно рассматривать в двух основных направлениях: микровзаимодействие (молекулярное взаимодействие) и макровзаимодействие (взаимодействие макрочастиц – тромбоцитов).

Известно, что процесс агрегации тромбоцитов представляет собой крайне сложную систему клеточных биохимических реакций, которые осуществляются в тесном взаимоотношении с мембраной кровяных пластинок. Так, АДФ-индуцированная агрегация тромбоцитов опосредована активацией пуринорецепторов, связанных с кальциевыми каналами мембраны [231]. Активация тромбоцитов приводит к экспрессии Ca-зависимых рецепторов для ряда высокомолекулярных лигандов (фибриногена, фибронектина и фактора Виллебранда), локализованных в гликопротеидном комплексе *Pb-IIIa* [232]. Возможные конформационные перестройки мембраны тромбоцитов, изменения взаимного расположения ее компонентов и гидратации мембранных белковых структур, несомненно, могли бы оказать значительное влияние на индуцированную агрегацию тромбоцитов.

Основываясь на указанных данных, можно предположить, что наблюдаемый эффект ингибирования функциональной активности тромбоцитов опосредован рецепторо- и мембранотропным действием излучения на частотах спектра оксида азота.

Можно предположить и другие вероятные механизмы ингибирующего воздействия на тромбоциты КВЧ- и ТГц- волн [226,233,234]. Во-первых, изменение конформации и гидратации пуринорецепторов тромбоцитов могло вызвать снижение их чувствительности к индуцирующему агрегацию веществу (АДФ). Конформационные изменения кальциевых каналов, сопряженных с данными рецепторами, могли привести к уменьшению поступающих в клетку ионов Ca^{2+} , что также привело бы к уменьшению ответной реакции кровяных пластинок. Данный механизм ингибирующего влияния воздействия ЭМИ на частотах молекулярного спектра оксида азота наиболее вероятен для влияния на процесс активации тромбоцитов.

Во-вторых, ТГц-индуцированные конформационные изменения гликопротеидного рецепторного комплекса *Pb-IIIa* и ассоциированного с ним участка тромбоцитарной мембраны, а также изменение гидратации ком-

плекса могло вызвать нарушение процессов связывания рецептора с высокомолекулярными лигандами, прежде всего с фибриногеном.

В-третьих, ТГц-индуцированное изменение конформации и гидратации высокомолекулярных лигандов, принимающих непосредственное участие в процессах агрегации, прежде всего фибриногена, могло привести к снижению сродства данных соединений с гликопротеидными рецепторными комплексами Пв-Ша. Данные эффекты также способны ингибировать агрегационную активность тромбоцитов.

Таким образом, не исключается сочетание описанных предполагаемых механизмов ингибирующего воздействия на тромбоциты ТГц-волн на частотах спектров газов-метаболитов, например оксида азота.

Известно также, что оксид азота образуется путем окисления аминокислоты L-аргинина под влиянием NO-синтазы [235–239]. Оксид азота взаимодействует с железом гема-гуанилатциклазы и активирует ее [223,240,241]. Активная гуанилатциклаза катализирует биосинтез циклического 3'5'-гуанозинмонофосфата (цГМФ) – мощного регулятора метаболизма клетки, проявляющего антиагрегационное действие. Не исключено, что механизм антиагрегационного эффекта электромагнитных волн на частотах молекулярного спектра поглощения и излучения оксида азота обусловлен их воздействием на активность ферментов NO-синтазы и гуанилатциклазы [241], приводящим в конечном итоге к образованию цГМФ, обладающего наряду с цАМФ мощными антиагрегационными свойствами.

Взаимодействие электромагнитного поля и молекулы NO можно объяснить также наличием неспаренного электрона в молекуле NO. Экспериментально подтверждено сильное взаимодействие с вращающимся электрическим полем E волны [225], возбуждаемым в квазиоптической согласованной нагрузке с тромбоцитами. Таким образом, повышается реакционная способность NO.

Механизм макровзадействия следует характеризовать также соотношением размеров макрочастицы R и длины волны $\lambda \approx 0,2$ мм излучения в биосреде.

Частицу или тромбоцитарный агрегат можно представить в виде открытого диэлектрического резонатора, например в виде шара, имеющего собственную резонансную частоту:

$$f_p = \frac{150 \cdot p}{\pi \cdot R \cdot \sqrt{\epsilon}},$$

где $p \cong 3$ или 4 – параметр, зависящий от типа колебаний поля H_{101} или E_{101} соответственно. Из формулы следует, что поле E_{101} типа колебаний молекулярной частоты NO 150,176 ГГц будет вступать в резонансное взаимодействие с тромбоцитарным агрегатом размером $R \approx 0,146$ мм. Причем во взаимодействие может вступать и 2-я гармоника поля $fp \approx 300$ ГГц с частицей, имеющей $R \approx 0,07$ мм, т.е. на порядок больше размера тромбоцита.

Поэтому поле такой частоты не оказывает сильного влияния на тромбоцит, кроме поляризующего действия, так как $\lambda \gg R$ (радиус тромбоцита).

Однако если тромбоциты начинают агрегировать, размер частицы растет, и как только ее размер становится соизмеримым с длиной волны поля, частица вступает в резонансное взаимодействие с полем, т.е. происходит дезагрегация тромбоцитов [241]. Таким образом, частота облучающего поля определяет тот размер «агрегатов», с которого начинается процесс дезагрегации.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о выраженном ингибирующем воздействии ТГц-волн на частотах молекулярного спектра оксида азота на функциональную активность (активацию и агрегацию) тромбоцитов больных нестабильной стенокардией.

4.3. Исследование терагерцового индуцированного межклеточного взаимодействия в системе форменных элементов крови

Цель исследований – установление возможности индуцированного взаимодействия между двумя образцами форменных элементов крови, один из которых был предварительно подвергнут воздействию излучения на частотах спектра метаболита – оксида азота (150,176–150,644 ГГц).

Исследования проведены на образцах крови больных нестабильной (количество пациентов $n = 48$) и стабильной ($n = 51$) стенокардией, у которых до начала лечения способность тромбоцитов и эритроцитов к агрегации была увеличена, а деформируемость мембран эритроцитов снижена [242–244].

Взаимодействие форменных элементов крови больных стенокардией проводили в системах: облученные тромбоциты – инкубированные необлученные тромбоциты; облученные эритроциты – инкубированные необлученные эритроциты; облученные эритроциты – инкубированные необлученные тромбоциты.

Для достижения одинаковых условий взаимодействия образцы форменных элементов брали с одинаковым объемом и помещали в две кюветы, а затем в контейнер, полученный соединением навстречу двух квазиоптических нагрузок (рис.49). Таким образом, исключалось взаимодействие с внешними тепловыми, световыми и электромагнитными полями, а также отражения внутри нагрузки. Это давало возможность в эксперименте учитывать взаимодействия лишь между двумя образцами форменных элементов крови.

Следует отметить, что для осуществления нетеплового взаимодействия всех форменных элементов в объеме предусматривалось перемешивание образцов путем плавного поворота всего контейнера каждые пять минут в течение всего периода инкубации.

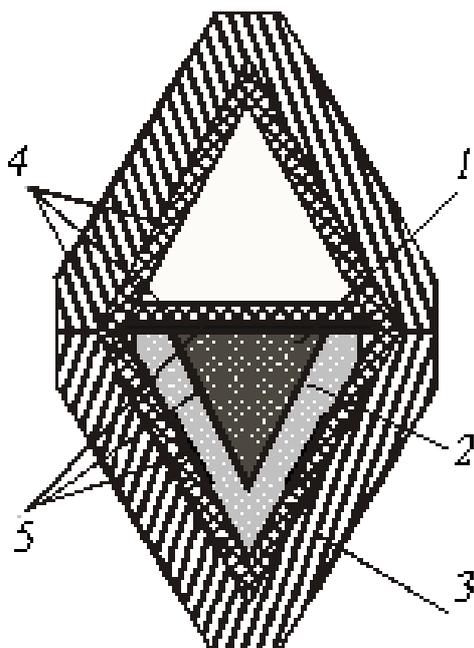


Рис. 49. Контейнер, применяемый для инкубации образцов форменных элементов крови: 1– форменные элементы крови, подвергнутые облучению; 2– интактные форменные элементы крови; 3– электромагнитный экран; 4– поглощающий ЭМИ материал ($\text{tg } \sigma = 0,1$); 5– полипропилен

Образцы форменных элементов крови больных стенокардией подвергались воздействию в течение 5 минут электромагнитного излучения ТГц-диапазона 150,176–150,644 ГГц, соответствующего молекулярному спектру поглощения и излучения оксида азота, с использованием панорамно-спектрометрического измерительного комплекса с квазиоптическим рефлектометром, работающим в диапазоне 118–600 ГГц.

Время нахождения облученных форменных элементов крови с необлученными составило 30 минут.

Функциональную активность тромбоцитов оценивали по их способности к агрегации, которую определяли при помощи лазерного анализатора агрегации «БИОЛА-230Ltd», сопряженного с компьютером. Способность эритроцитов к агрегации и деформируемость их мембран определяли анализатором крови реологическим (АКР-2) по методу, описанному в [231]. В качестве контрольных использовались интактные форменные элементы крови (тромбоциты и эритроциты) больных стенокардией, не подвергнутые облучению электромагнитными волнами. Контрольный образец находился в КВЧ-экранированном металлическом контейнере.

Статистический анализ полученных данных проводился при помощи стандартных программ Microsoft Excel 2000 и SPSS 10.0.5 for Windows.

Установлено, что тромбоциты больных стенокардией, подвергнутые облучению электромагнитным излучением на частотах 150,176–

150,644 ГГц, соответствующих молекулярному спектру поглощения и излучения оксида азота, при падающей плотности мощности $0,1 \text{ мВт/см}^2$ изменяют свою функциональную активность, что сопровождается угнетением их активации и агрегационной способности. Это приводит к уменьшению начальной скорости агрегации, максимального радиуса и максимальной скорости образования тромбоцитарных агрегатов, максимальной степени и максимальной скорости агрегации, увеличению времени достижения максимального радиуса тромбоцитарных агрегатов (табл. 9).

Инкубация в течение 30 минут облученных тромбоцитов со сниженной функциональной активностью с тромбоцитами больных стенокардией, не подвергавшихся облучению, также приводила к угнетению у последних процесса активации и агрегации, о чем свидетельствуют статистически достоверные изменения в показателях агрегатограммы по сравнению с данными группы контроля.

Таблица 9. Характер изменений в активации и агрегации тромбоцитов больных стенокардией при их инкубации с облученными тромбоцитами

Показатели	Контроль-интактные тромбоциты больных стенокардией ($n = 48$)	Облученные тромбоциты в режиме амплитудной модуляции ($n = 8$)	Необлученные тромбоциты, инкубированные с облученными ($n = 8$)
Начальная скорость агрегации, усл. ед.	$47,86 \pm 9,10$	$34,70 \pm 6,59$	$27,62 \pm 6,82$
Максимальный радиус тромбоцитарных агрегатов, %	$5,63 \pm 1,01$	$4,61 \pm 0,55$	$3,37 \pm 0,75$
Время достижения максимального радиуса агрегатов, с	$64,64 \pm 4,24$	$95,64 \pm 13,84$	$141,86 \pm 15,56$
Максимальная скорость образования тромбоцитарных агрегатов, усл. ед.	$9,18 \pm 2,04$	$6,99 \pm 1,08$	$4,82 \pm 1,50$
Максимальная скорость агрегации, усл. ед.	$70,02 \pm 9,22$	$51,03 \pm 2,63$	$44,74 \pm 7,11$

Облучение эритроцитов больных стенокардией ЭМИ на частотах молекулярного спектра поглощения и излучения оксида азота при падающей плотности мощности $0,3 \text{ мВт/см}^2$ сопровождалось возрастанием их способности к агрегации и снижением деформируемости мембран эритроцитов (табл. 10).

Проверялось взаимодействие в системе облученная плазма – необлученные инкубированные форменные элементы, где не было выявлено статистически достоверного измерения. Последний факт говорит о непосред-

ственном участии звена форменных элементов крови (тромбоцитов и эритроцитов) в процессе взаимодействия с ЭМИ ТГц-диапазона.

Таблица 10. Характер изменений в свойствах эритроцитов больных стенокардией при их инкубации с облученными эритроцитами на частотах

Индекс, усл. ед.	Контроль-интактные эритроциты больных ($n = 8$)	Плотность мощности 0,3 мВт/см ²		Плотность мощности 3 мВт/см ²	
		ОЭ ($n = 12$)	ИЭ ($n = 12$)	ОЭ ($n = 9$)	ИЭ ($n = 9$)
Агрегации	1,34 ± 0,01	1,42 ± 0,02	1,39 ± 0,02	1,32 ± 0,01	1,37 ± 0,02
Деформируемости	1,06 ± 0,001	1,05 ± 0,001	1,00 ± 0,002	1,05 ± 0,001	1,05 ± 0,001

Примечание: ОЭ – облученные эритроциты; ИЭ – инкубированные эритроциты.

Таким образом, обнаружен новый эффект – изменение функциональной активности тромбоцитов и эритроцитов больных стенокардией, предварительно облученных ЭМИ на частотах спектра метаболита – оксида азота. Факт возможности влияния друг на друга клеток крови, разделенных пространственно ТГц-прозрачным материалом, доказывается наличием статистически достоверных изменений функциональной активности тромбоцитов и эритроцитов, не подвергнутых непосредственно излучению. Это позволяет сделать вывод о существовании индуцированного межклеточного взаимодействия. Можно также полагать, что в целостном организме регуляция деятельности различных клеточных систем осуществляется не только за счет нервных и гуморальных механизмов, но и посредством межклеточных нетепловых взаимодействий, осуществляемых электромагнитными волнами ТГц-диапазона на частотах молекулярного спектра поглощения и излучения различных клеточных метаболитов. Кроме того, необходимо отметить, что форменные элементы крови могут быть удобной моделью для исследования ТГц-индуцированных межклеточных взаимодействий.

4.4. Изменение метаболических процессов в крови при воздействии электромагнитного излучения на частотах молекулярного спектра поглощения и излучения атмосферного кислорода

Основная функция эритроцитов – транспорт дыхательных газов (кислорода и углекислого газа) к клеткам организма, поэтому целью настоящего исследования явилось изучение влияния электромагнитных колебаний на частотах молекулярного спектра атмосферного кислорода на функциональное состояние эритроцитов у животных (*in vitro*) при контакте их с атмосферным воздухом.

Работа выполнена при участии сотрудников Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова.

В экспериментах использовали кровь, полученную от 15 здоровых коров, которую стабилизировали цитратом натрия (3,8%–9:1). Одну порцию крови центрифугировали при 1500 об/мин в течение 15 минут, удаляли надосадочный слой и оставшуюся эритроцитарную массу дважды промывали и ресуспензировали в изотоническом растворе (0,8% NaCl) в объеме, обеспечивающем такую же концентрацию эритроцитов, как и в интактной крови. Взвесь эритроцитов делили на две части: одна служила для контроля, а вторую подвергали воздействию изучения на одной из частот спектра молекулярного кислорода 129 ГГц.

Опытные образцы помещали в квазиоптическую нагрузку панорамно-спектрометрического квазиоптического измерительного комплекса с доступом атмосферного воздуха к образцам через квазиоптический тракт. Точность установки частоты по волномеру измерительного комплекса составляла $\pm 0,1$ ГГц, плотность мощности облучения 10^{-3} Вт/см². Цельная кровь и взвесь эритроцитов помещались в полипропиленовую кювету в экранированную квазиоптическую нагрузку. Экспозиция образцов проводилась в течение 15, 30, 90 минут.

В контрольных и опытных образцах крови определяли количество эритроцитов, скорость оседания эритроцитов (СОЭ), концентрацию гемоглобина, показатель гематокрита, осмотическую резистентность эритроцитов, эритрофоретическую подвижность эритроцитов (ЭФПЭ), переокисление липидов (ПОЛ) по уровню малонового диальдегида, предел текучести, агрегацию эритроцитов и коэффициент агрегации эритроцитов с использованием общепринятых методик.

Проведенные исследования с кровью животных (*in vitro*) свидетельствуют о том, что количество эритроцитов, после воздействия ЭМИ на частоте 129 ГГц, достоверно уменьшается ($P < 0,05$) с $6,88 \pm 0,36$ до $4,97 \pm 0,49 \times 10^{12}/л$. При этом количество эритроцитов изменяется в зависимости от времени воздействия ЭМИ, достигая минимума ($5,02 \pm 0,47 \times 10^{12}/л$) через 90 минут.

Цитофотометрические показатели эритроцитов, полученные путем исследования на автоматическом анализаторе микрочастиц, выявили увеличение среднего диаметра, периметра и объема эритроцитов в опытных образцах.

Таким образом, наряду со снижением количества эритроцитов в опытных образцах крови *in vitro* происходит увеличение диаметра, периметра и объема эритроцита, что указывает на непосредственное воздействие электромагнитного излучения на частотах поглощения и излучения атмосферного кислорода на морфофункциональное состояние эритроцитов (табл. 11).

Хорошо известно, что почти немедленно после остановки движения крови эритроциты ассоциируют с образованием «монетных столбиков», которые объединяются с образованием трехмерной сети. В процессе изменения скорости оседания эритроцитов происходит реорганизация сети, по-

скольку продолжающиеся метаболические процессы приводят к «набуханию сети» за счет изменения коллоидного состояния плазмы, с одной стороны, и метаболической активности – с другой. Это, по всей видимости, объясняется тем, что в цельной крови эритроциты в условиях *in vitro* продолжают потреблять кислород, генерируя его активные формы [142,245]. В условиях аноксии, в которых кровь пребывает, при измерении СОЭ зернистые клетки крови могут получать кислород только из эритроцитов, поэтому СОЭ существенна как величина, зависящая от степени насыщения кислородом зернистых клеток крови.

Таблица 11. Показатели физических параметров эритроцитов при воздействии ЭМИ на частоте 129 ГГц в условиях *in vitro* (n=15)

Показатели	Группы			
	контрольная	опытная,		
		15 мин	30 мин	90 мин
Объем, мкм ³	21,1±2,5	28,9±3,0	29,3±1,2	31,1±2,4
Плотность эритроцита, усл. ед.	1,134±0,013	1,124±0,004	1,120±0,003	1,114±0,003
Концентрация воды в эритроците, %	60,1±1,2	63,9±1,1	64,2±0,9	66,0±1,1
Относительный показатель преломления, усл. ед.	1,088±0,002	1,081±0,003	1,082±0,002	1,079±0,004

Таблица 12. Изменение показателей крови при воздействии ЭМИ (129 ГГц) в условиях *in vitro* (n=15)

Группы	Концентрация Нь, г/л	Показатель гематокрита, %	Осмотическая резистентность эритроцитов гемолиза, %
Контрольная	111,5±3,44	36,40±2,06	0,50±0,04
Опытная, 15 мин	93,5±2,72	47,75±4,92	0,35±0,05
Опытная, 30 мин	90,4±1,95	47,65±3,27	0,36±0,03
Опытная, 90 мин	87,8±2,05	46,51±2,95	0,32±0,05

Проведенные исследования показали, что воздействие ЭМИ на частотах молекулярного спектра поглощения и излучения атмосферного кислорода на эритроцитарную взвесь оказывает существенное влияние на осмотическую резистентность эритроцитов. Было установлено, что 100% гемолиз в опытных образцах крови *in vitro* практически наблюдается в растворе NaCl 0,15%-ной концентрации. При этом была выявлена различная устойчивость опытных и контрольных образцов крови *in vitro* к гемолитическому действию гипотонических растворов. Данные, представленные в табл. 12, показывают, что осмотическая резистентность эритроцита при воздей-

ствии ЭМИ на частотах спектра O_2 статистически достоверно падает. Вероятно, это обусловлено тем, что электромагнитные волны приводят к разбалансировке расположения молекул липидов в эритроците, уменьшая силу гидрофобных взаимодействий.

По всей видимости, ЭМИ на частоте спектра поглощения и излучения кислорода (129 ГГц) повышает окисление глутатиона, за счет возрастания активности окислительных ферментов, что сопровождается снижением концентрации гемоглобина в среднем на 16,14% ($P < 0,05$), и возрастанием показателя гематокрита на 30,9% ($P < 0,05$).

Исследование реологических свойств крови до и после воздействия ЭМИ показывает, что вязкость крови статистически достоверно ($P < 0,05$) снижается при больших скоростях сдвига. Причем необходимо отметить, что уменьшение вязкостных свойств крови наблюдается при времени экспозиции в 90 минут.

Таким образом, проведенные исследования показали, что электромагнитное воздействие КВЧ на частотах молекулярных спектров поглощения и излучения атмосферного O_2 вызывает существенные изменения реологических свойств крови у клинически здоровых животных (*in vitro*) (табл. 13).

При этом предел текучести уменьшается через 30 минут на 15,5%, а через 90 минут – в 1,4 раза. Агрегация эритроцитов увеличивается, в опытных образцах соответственно через 15 минут на 17%, 30 – на 67%, а через 90 минут – на 83% в сравнении с контрольными образцами.

Таблица 13. Показатели некоторых гемореологических свойств крови лактирующих коров при воздействии ЭМИ на частоте 129 ГГц в условиях *in vitro*

Показатели	Контроль	Время воздействия ЭМИ 2 мин		
		15	30	90
Агрегация эритроцитов, дин/см	30,0±1,40	35,3±2,23	40,1±1,42	55,1±1,3
Коэффициент агрегации эритроцитов, %	1,55±0,12	2,02±0,4	2,45±0,14	1,84±0,34
Структурная вязкость, усл.ед.	28,4±0,4	25,2±0,024	24,1±0,62	20,1±0,42
Предел текучести, дин/см	0,57±0,09	0,55±0,08	0,42±0,08	0,23±0,08

Особенно важное значение для процессов, происходящих на мембранном уровне, имеет активация фосфолипазы А₂, гидролизующей сложноэфирную связь между остатком глицерина и ненасыщенным ацильным радикалом фосфолипидов липидного биослоя мембраны эритроцита. Следствием этого гидролиза является, во-первых, образование свободных ненасыщенных жирных кислот и в первую очередь арахидоновой кислоты, трансформирующейся в простагландины, тромбоксаны и лейкотриены, и, во-вторых, накопление лизофосфатидов, обладающих выраженным хао-

тропным действием. Метаболические и физиологические эффекты, вызываемые воздействием ЭМИ ТГц-диапазона наряду с детергентным действием проникающих в эритроциты из плазмы крови жирных кислот, приводят к нарушению структуры билипидного слоя эритроцитов, изменению конформации и архитектоники, а также снижению функциональной активности связанных с ним белков эритроцита. Сдвиг тканевого баланса в сторону увеличения активности прооксидантов приводит к окислительным стрессам (табл. 14).

Таблица 14. Изменение активности ферментов эритроцитов при воздействии ЭМИ (129 ГГц) в условиях *in vitro* (n = 15)

Активность ферментов	Контроль	Время воздействия ЭМИ КВЧ, мин		
		15	30	90
Супероксиддисмутаза, ед./мл	50,8±2,3	56,5±2,4	54,9±3,0	41,3±1,9
Каталаза, ед./мл	12,5±0,5	13,2±0,6	10,4±0,5	7,4±0,4
Глутатионпероксидаза, ммоль/л	78,1±4,8	82,5±5,3	80,4±5,2	68,5±4,4
Глутатионредуктаза, мкмоль/мл	102,5±11,6	116,5±12,6	137,5±15,2	104,5±12,2

Полученные данные свидетельствуют о том, что облучение в амплитудно-модулированном и непрерывном режимах обогащенной тромбоцитами плазмы на частотах молекулярного спектра излучения и поглощения оксида азота приводит к нормализации процесса активации и агрегации тромбоцитов у больных нестабильной стенокардией. Следовательно, электромагнитные влияния на частотах молекулярных спектров излучения и поглощения веществ, участвующих в метаболических процессах, способствуют восстановлению нарушения в тромбоцитарном звене системы гемостаза у больных ишемической болезнью сердца за счет нормализации уровня клеточных метаболитов до физиологической концентрации (в том числе оксида азота) непосредственно в клетках, в частности, форменных элементах крови. Отмеченный блокирующий эффект на функцию тромбоцитов ЭМИ на частотах молекулярных спектров поглощения и излучения оксида азота аналогичен результатам, полученным при биохимических исследованиях непосредственно ингибирующего действия оксида азота в определенных концентрациях на тромбоциты.

Таким образом, можно предположить, что электромагнитное излучение на частоте молекулярного спектра поглощения оксида азота вызывает повышение реакционной способности оксида азота и увеличение продолжительности существования его в клетках, вероятно, вследствие активации NO-синтазы – фермента, способствующего образованию оксида азота из аминокислоты аргинина.

5. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ НА РОСТ ПРОКАРИОТИЧЕСКИХ КЛЕТОК КИШЕЧНОЙ ПАЛОЧКИ *E.coli*

5.1. Воздействие электромагнитного излучения на частотах из области спектра поглощения молекулярного кислорода на рост прокариотических клеток

Наличие кислорода в питательной среде кишечной палочки является необходимым условием роста культуры. В связи с этим было изучено влияние воздействия ЭМИ на одной из частот, характерного для спектра молекулярного поглощения атмосферного кислорода (129 ГГц), на развитие популяций прокариотов *E.coli* - К-12 АВ1157.

5.2. Аппаратура и методы исследования

Одним из важных условий культивирования кишечной палочки *E.coli* является температура окружающей среды 35–40°C [146,147,246]. При проведении исследований воздействия электромагнитного излучения ТГц-диапазона на прокариотические клетки *E.coli* необходимо обеспечить условия термостабилизации в процессе облучения. В связи с этим была разработана установка, состоящая из квазиоптического генератора 1 и электрического суховоздушного термостата ТС-80М-2 2 (рис. 50).

Технические параметры термостата обеспечивают поддержание температуры в диапазоне от +28°C до +55°C. Для исследования нетепловых эффектов, связанных с воздействием электромагнитного излучения, и исключения влияния температурного фактора на результаты эксперимента точность поддержания температуры в рабочей камере термостата была увеличена до 0,25°C. С помощью квазиоптического программируемого генератора (подробное описание приведено в разделе 2) обеспечивалось облучение объектов исследования на частоте, характерной для молекулярного поглощения атмосферного кислорода 129±2 ГГц. Выход 13 квазиоптического тракта 4 (см. рис. 51) монтировался в камеру термостата с использованием термоизоляционного материала, его блок-схема представлена справа на рис. 50. Камера термостата выполнялась в виде квазиоптического резонатора прямоугольной формы с размером 395x400x500 мм. В центре рабочей камеры 3 термостата находилась чашка Петри с биосредой 5.

Кислород является важнейшим регулятором биологических процессов в его так называемых реактивных формах (РФК). Именно РФК рассматривается как одна из систем внутриклеточных и межклеточных мессенджеров [142,247]. В этой связи было изучено влияние воздействия ЭМИ на одной из частот второй спектральной области молекулярного поглощения атмосферного кислорода (129 ГГц) на развитие популяций прокариотов *E.coli* К-12 штамм АВ1157 в условиях термостатирования эксперимента.

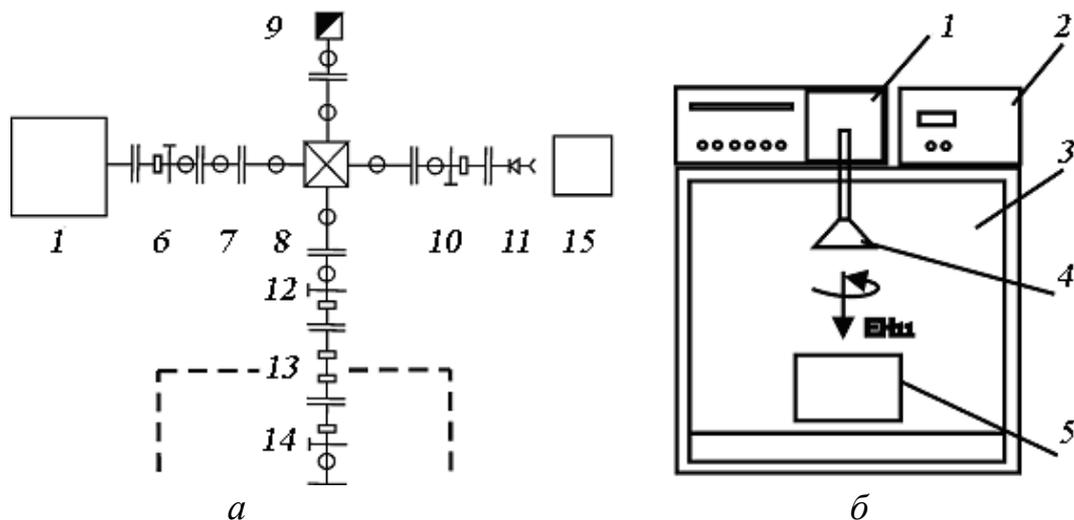


Рис.50. Установка (а) и блок-схема (б) квазиоптического тракта: где 1– генератор в ТГц-диапазоне; 2– электрический суховоздушный термостат ТС-80М-2; 3– рабочая камера термостата; 4– квазиоптический тракт (б); 5– чашка Петри с биосредой; 6– волноводно-лучевой переход 3.562.623-01÷04; 7– лучевод 3.569.362; 8– направленный ответвитель 3.587.010; 9– нагрузка согласованная 3.580.126; 10– волноводно-лучевой переход 3.562.623-01÷04; 11– детекторная головка в диапазоне 53,7-270 ГГц; 12– волноводно-лучевой переход 3.562.623-01÷04; 13– переходной тепло-изоляционный квазиоптический волновод; 14– волноводно-лучевой переход 3.562.623-01÷04; 15– индикатор излучения

Суточную агаровую культуру *E.coli* К-12 смывали физиологическим раствором. Концентрацию клеток по оптическому стандарту мутности доводили до 105 микробных тел в 1 мл и по 0,2 мл этой взвеси засеивали в мясопептонный бульон (МПБ), разлитый по 100 мл в 5 колб Эрленмейера объемом 300 мл. На спектрофотометре СФ-26 при длине волны 560 нм определяли оптическую плотность полученных взвесей. Посевы помещали в термостат при 37 °С. Одна из колб служила для контроля, четыре другие – опытные.

Через каждые два часа роста одну из опытных колб извлекали из контейнера и в том же термостате подвергали облучению на частоте поглощения атмосферного кислорода в течение 30 минут при плотности мощности 0,3 мВт/см², после чего вновь помещали в контейнер и продолжали культивировать до конца суток. Другую опытную колбу подвергали условиям аэрации, помещая на круговую качалку УВМТ-12-250. По окончании культивирования (24 часа) определялась оптическая плотность исследуемых образцов, разведенных стерильным МПБ 1:10.

5.3. Результаты экспериментов и выводы

Воздействие ЭМИ ТГц-излучения в течение 4–6 часов (фаза логарифмического размножения) стимулирует развитие популяции (рис.51). Известно, что в этой фазе культуры бактерий обладают наибольшей физиоло-

гической активностью и проявляют наибольшую чувствительность к действию различных экзогенных и эндогенных факторов, стимулирующих или подавляющих их рост [142,248].

Оптическая плотность культур, облученных в начальной и стационарной фазах (0, 12 часа), незначительно отличалась от контрольной.

Тот факт, что скорость развития популяций, облученных в начальной (2 час) или максимальной стационарной (12 час) фазах, существенно не изменяется, позволяет предположить, что активация роста культур, облученных в логарифмической фазе развития (4–6 час), обусловлена скорее всего, образованием РФК из кислорода, содержащегося в цитоплазме активно делящихся клеток, а не в питательной среде. В пользу этого свидетельствует и то, что облучение покоящихся клеток (0 час) также не приводит к стимуляции их роста при последующем культивировании.

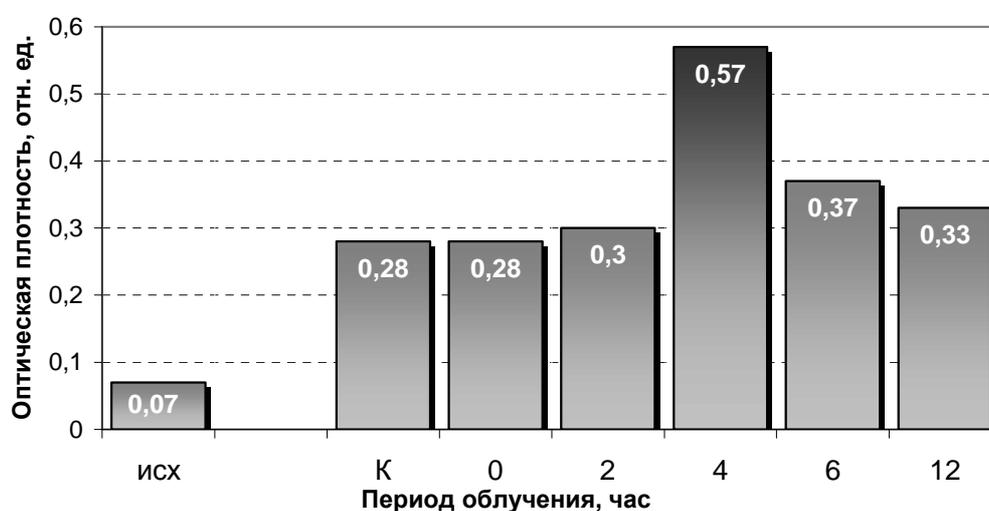


Рис. 51. Оптическая плотность суточных культур *E.coli* К-12: исх. – покоящаяся культура; К – контроль, культура в условиях термостата (не облученная); 0,2,4,6,12 – время, на котором проводилось облучение (длительность облучения 30 минут)

Полученные результаты, с одной стороны, совпадают с опубликованными данными [249], свидетельствующими о значении стадии развития культуры бактерий для достижения биологического эффекта. Однако в наших исследованиях наибольший эффект был получен при облучении культуры в фазе логарифмического размножения, а в упомянутой выше работе это была максимальная стационарная фаза. Данное противоречие можно объяснить исходя из утверждения тех же авторов о том, что число возможных переменных воспроизводимости воздействия ЭМИ ТГц-диапазона далеко выходит за пределы обычно контролируемых параметров. В нашем случае наиболее существенный параметр – частотная характеристика ЭМИ – частота атмосферного поглощения кислорода.

Во второй серии экспериментов по результатам измерения величины оптической плотности были зафиксированы ростовые кривые культур

E.coli К-12 (рис. 52), которые культивировались в условиях термостата: культур, подвергавшихся воздействию излучения (кривая – облучение); культур в условиях аэрации на качалке (кривая – аэрация); культур, не подвергавшихся воздействию – контрольная (кривая – контроль).

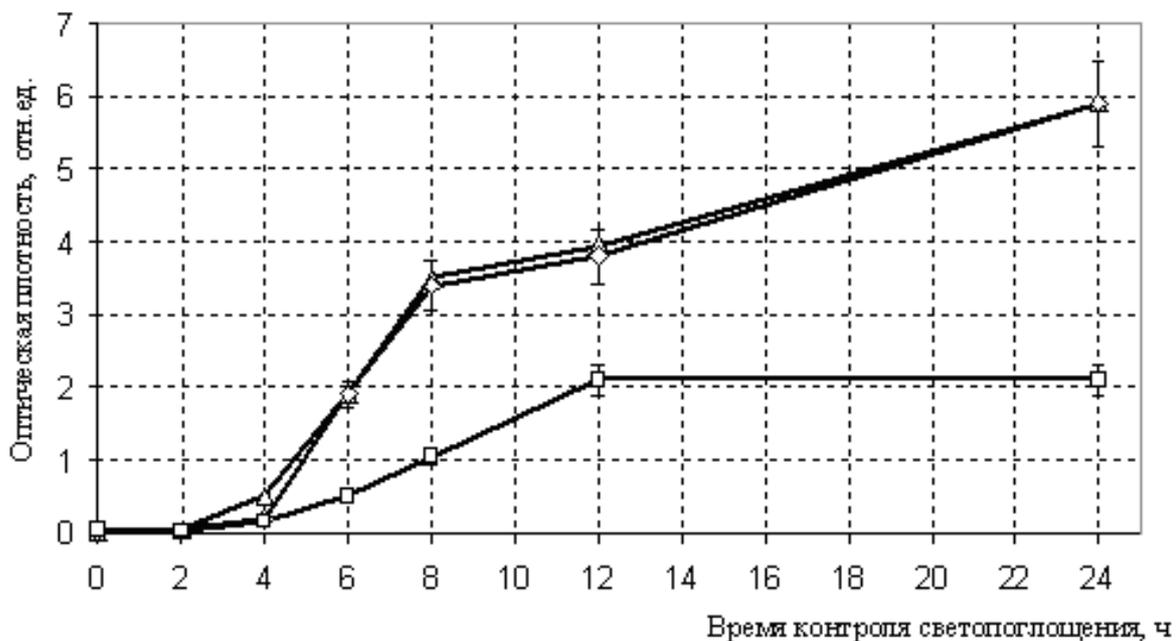


Рис. 52. Ростовые кривые культур *E.coli* К-12: \triangle – аэрация, \diamond – облучение, \square – контроль

Культура, развивавшаяся в условиях усиленной аэрации, к 4-му часу роста существенно опережала культуры, развивавшиеся в термостате. После воздействия на 4-м часу развития ЭМИ на одной из частот спектра поглощения кислорода (129 ГГц) скорость роста облученной культуры существенно возросла и через 2 часа (к 6-му часу) по показателю величины оптической плотности она оказалась равной аэрируемой и значительно опережала контрольную группу бактерий.

Известно, что аэрация среды культивирования микроорганизмов приводит к усилению метаболических процессов, сокращению времени генерации и повышению накопления биомассы за счет насыщения питательной среды атмосферным кислородом, постоянно вводимым в нее. Можно предположить, что облучение ЭМИ на частоте поглощения атмосферного кислорода активизирует не только и не столько кислород, содержащийся в питательной среде, но главное, как указано выше, повышает реакционную способность не только атмосферного кислорода, диффундируемого в биомассу, но и внутриклеточного кислорода [142] за счет образования его реактивных форм. Об этом свидетельствует близость точек в ростовых кривых, измеренных на 6-м часу развития аэрируемой культуры и культуры, подвергнутой облучению на 4-м часу развития.

6. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ДАФНИИ

6.1. Обоснование выбора объекта: дафния – экологический биотест–объект

Как уже неоднократно отмечалось, фундаментальной основой функционирования сложных биологических систем являются молекулы – метаболиты, стабильные и строго воспроизводимые молекулярные структуры биосреды.

Кислород как важнейший биологический и экологический фактор оказал большое влияние на выработку различных приспособительных механизмов дыхания. Информация о дыхании водных животных в условиях гипоксии базируется в основном на данных об интенсивности общего потребления кислорода. Она не достаточна для выяснения закономерностей реакции системы обеспечения кислородом организма (СОКРО) на гипоксию (недостаток кислорода) [210]. Слабо изученным в настоящее время остается вопрос о биохимических, физиологических, экологических и биологических механизмах адаптации водных животных к дефициту кислорода. Не выяснен до настоящего времени также вопрос об особенностях приспособительных механизмов дыхания к дефициту кислорода у филогенетически различных групп водных животных и зависимости ответной реакции СОКРО от глубины гипоксии и скорости падения напряжения кислорода в воде. Например, при дефиците кислорода моллюски и бокоплавыв резко снижают свою двигательную активность, что приводит к снижению энергозатрат и к уменьшению кислородного запроса. В то же время у дафнии в силу того, что ее нормальный образ жизни предполагает непрерывное «парение» в воде, такой механизм регулирования энергозатрат затруднен.

Соответственно эти рачки, в отличие от моллюсков и бокоплавов, всегда нуждаются в определенной энергии; они не могут в значительной степени снизить потребности в кислороде. Угнетение активности любого из органов СОКРО могло бы отразиться на кислородном режиме организма дафний, что в итоге привело бы к недостатку энергии и нарушению нормального образа жизни этих животных.

Известно, что дафния используется в качестве биологического индикатора и является своего рода модельным объектом при экологических исследованиях, в частности, при определении степени загрязнения воды [197,250]. Таким образом, используя модельный эксперимент с дафнией, можно, в частности, уточнить предельно допустимые уровни мощности ТГц-излучения, воздействующего на живые объекты, исследовать воздействие излучения в зависимости от частоты, мощности и времени воздействия и тем самым получить данные, необходимые для построения адекватной модели взаимодействия ТГц- излучения с биообъектами. Последнее

говорит об актуальности разработки методов и средств исследования взаимодействия терагерцовых волн с физическими и биологическими средами. В связи с этим была поставлена задача исследовать воздействие ЭМИ в окрестности частоты 129 ГГц, характерной для линии спектра поглощения и излучения кислорода, на функциональное состояние пресноводного рачка *Daphnia magna* Straus.

6.2. Воздействие излучения терагерцового диапазона частот на функциональное состояние дафнии

Действие излучения на дафнию фиксировалось по изменению характеристик ее сердечного ритма. Для определения этих характеристик использовалась установка, схема которой приведена на рис. 53 [191, 251, 252]. Квазиоптический генераторный комплекс 10,11,12 использовался в режиме, имитирующем молекулярный спектр поглощения атмосферного кислорода в области частоты ~129 ГГц. В качестве антенны 11,12 применялся волноводно-лучевой переход.

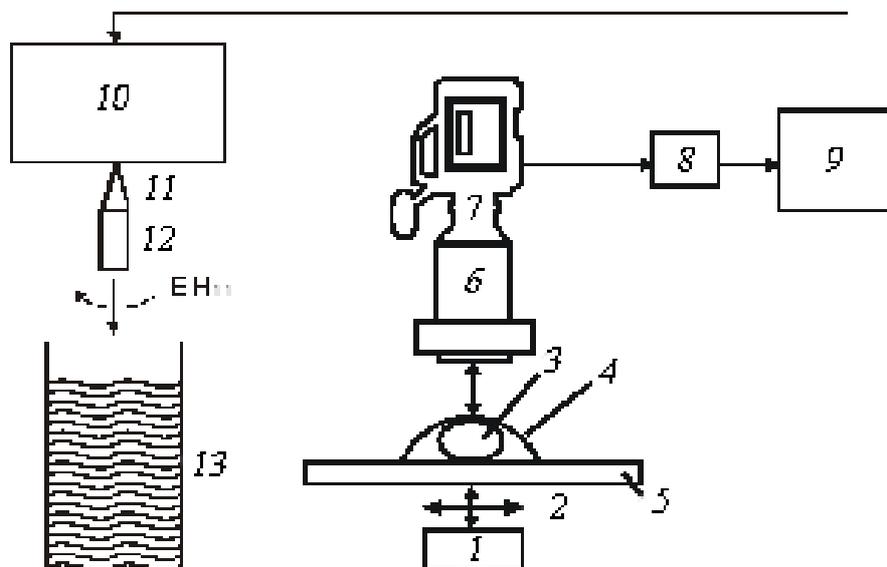


Рис. 53. Схема установки: 1 – источник света; 2 – линза; 3 – дафния; 4 – камера для дафнии; 5 – прозрачный столик; 6 – микроскоп; 7 – видеокамера; 8 – плата видеоввода; 9 – компьютер; 10 – квазиоптический терагерцовый генератор атмосферного кислорода; 11,12 – волноводно-лучевой переход и квазиоптический лучевой переход, формирующие поле $E_{H_{11}}$ с круговой поляризацией; 13 – водная среда с дафнией

Излучение источника света 1 фокусировалось линзой 2 в область сердца дафнии 3, помещенной в прозрачную камеру 4 на прозрачном столике 5 микроскопа 6. Видеоизображение биений сердца дафнии вводилось в компьютер 9 с помощью видеокамеры 7, платы видеоввода 8 и анализировалось с помощью специально разработанной программы. Для ввода изображения использовалась плата видеоввода Matrox Marvell G400, поддерживающая полноформатный ввод видеоматериалов со скоростью 30

кадров в секунду, и поставляемое с ней программное обеспечение для захвата видеоизображения в файл формата AVI. Частота сердечных сокращений (ЧСС) дафнии измерялась с помощью микроскопа после помещения дафнии в камеру, ограничивающую ее движения.

Программная часть системы функционировала в среде Windows'98. С ее помощью осуществлялся анализ введенного изображения. Программа позволяла анализировать введенное в компьютер видеоизображение колеблющегося сердца дафнии и осуществлять перебор кадров, при этом подсчитывалось число полных периодов сердечных сокращений дафнии и вычислялась частота сердцебиений.

Каждая дафния, находящаяся в водной среде объемом 2 мл³, подвергалась воздействию ЭМИ мощностью 2 мкВт в течение 15 минут на частоте второй зоны молекулярного поглощения атмосферного кислорода ~129 ГГц. Измерение ЧСС дафнии проводилось до и после воздействия ТГц-излучения. Результаты исследований приведены на рис.54.

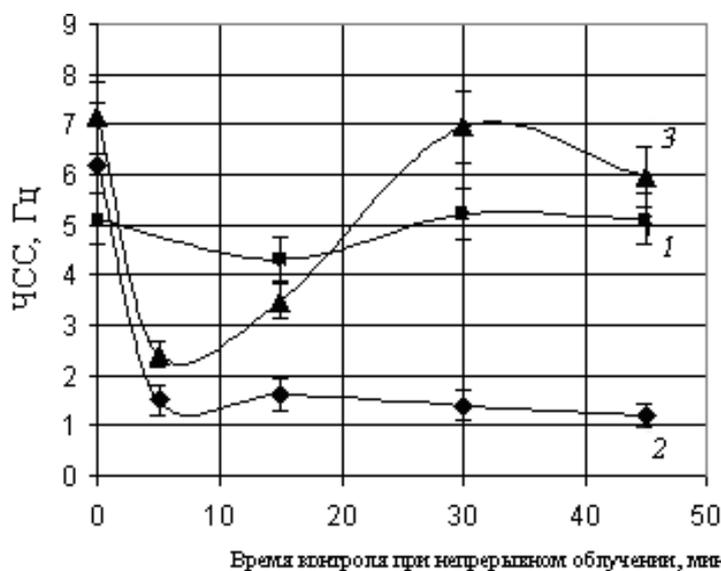


Рис. 54. Зависимость частоты сердцебиений от времени воздействия ТГц-излучения: \blacktriangle – фенол + ТГц-излучение, \blacksquare – ТГц-излучение, \blacklozenge – фенол

При проведении измерений для контрольной группы наблюдался разброс в изменении частоты сердцебиений $\pm 0,1$ Гц. Приведенная на рис. 54 зависимость свидетельствует о том, что после воздействия на водную среду с дафнией ТГц-излучения сдвиг частоты сердцебиений по мере увеличения времени воздействия уменьшается приблизительно на 0,8 Гц, достигая при этом минимальной величины, а затем частота сердечного ритма дафнии возвращается к исходному значению. Было исследовано также влияние ТГц-излучения на дафний, находящихся в водной среде, предварительно подвергнутых воздействию фенола. Для этого каждую дафнию помещали в раствор фенола концентрацией 50 мг/л на две минуты, т.е. подвергали стрессовому воздействию, измеряли частоту сердечного ритма, а затем возвращали в водную среду их обитания. Приведенная зависимость

свидетельствует о том, что подавленное состояние сердечного ритма дафнии вследствие воздействия фенолом после помещения дафнии в водную среду ее обитания (уже без фенола) сохраняется. На том же рисунке приведена зависимость частоты сердечного ритма дафний, которых после воздействия фенола облучили ТГц-излучением в течение 15 минут. Результаты этих измерений свидетельствуют о том, что такое воздействие приводит к восстановлению сердечного ритма.

Показано, что воздействие ТГц-излучения на дафнию, предварительно помещенную в раствор фенола, может приводить к восстановлению сердечного ритма дафнии в отличие от ситуации, когда такое воздействие отсутствует. Этот результат подтверждает одно из положений КВЧ-терапии [1,2] о проявлении лечебного эффекта, связанного с ТГц-излучением. Полученные результаты могут быть положены в основу исследований механизмов действия ТГц-излучений на биообъекты.

6.3. Изменение функционального состояния дафнии при воздействии потока атмосферного воздуха, возбужденного электромагнитным терагерцовым излучением

Сравнительный анализ экспериментальных исследований биологических эффектов при воздействии миллиметровых волн на экзогенный и эндогенный кислород фотосинтетиков *S.platensis* [141] и прокариотов *E.coli* K-12 АВ1157 [147] показал, что в жизнедеятельности живых организмов может принимать участие как эндогенный, так и экзогенный кислород, активизируемый воздействием электромагнитного излучения на частотах как первой (~50–70 ГГц), так и второй (~118–132 ГГц) полосы молекулярного поглощения атмосферного кислорода. Ниже представлены результаты экспериментального исследования изменения частоты сердечных сокращений пресноводного рачка – дафнии при воздействии на водную среду их обитания потока атмосферного воздуха, предварительно подвергнутого воздействию электромагнитного излучения на одной из частот второй полосы молекулярного поглощения атмосферного кислорода [253].

Терагерцовый спектр молекулы кислорода (O_2) имеет специфические особенности. Молекула кислорода не имеет электрического дипольного момента и благодаря наличию неспаренного электрона имеет значительный магнитный момент, поэтому для обеспечения эффективного взаимодействия с хаотическим ансамблем молекул в потоке атмосферного воздуха необходимо создать терагерцовое электромагнитное поле, имеющее круговую поляризацию. Для этого применялась рупорная антенна 2 (рис. 55) выходного сечения 8,8x10,8 мм. Антенна имела хорошее согласование с квазиоптическим полым диэлектрическим волноводом 4,5 (см. рис. 55) внутреннего диаметра 20 мм. Через два идентичных плеча квазиоптического разветвителя 5 с помощью вентилятора с регулируемой скоростью вращения 3 пропускался поток атмосферного воздуха. Изменением скорости вращения вентилятора в пределах 1000–3000 об/мин обеспечивалось изме-

нение скорости потока воздуха, который направлялся вдоль квазиоптического волновода 4,5. Использовался вентилятор с регулируемой частотой вращения лопастей Thermaltake ТТ-8025Т с напряжением питания 12 В. Согласованная квазиоптическая нагрузка 6 поглощала электромагнитное излучение, исключая переотражение. Таким образом, конструкция установки исключала воздействие электромагнитного излучения на водную среду.

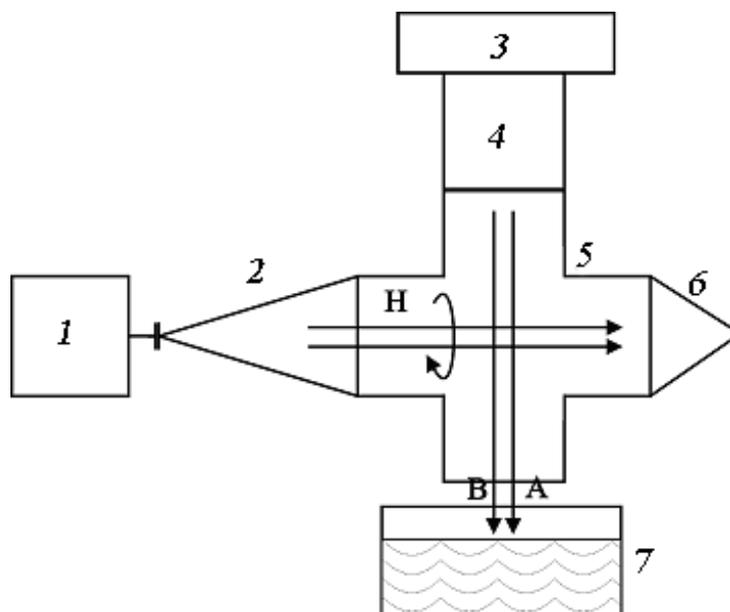


Рис. 55. Структурная схема установки: 1– генератор терагерцового диапазона частот, 2– преобразователь поляризации, 3– вентилятор, 4– квазиоптический волновод, 5– четырехплечий квазиоптический разветвитель, 6– квазиоптическая согласованная нагрузка, 7– сосуд с водой и дафнией, А, В–поток атмосферного воздуха, Н– терагерцовая волна с круговой поляризацией

На поверхность воды 7 (см. рис. 55) падает только облученный поток атмосферного воздуха, подвергнутый воздействию терагерцового излучения, следовательно, воздействие ЭМИ на водную среду и биообъект было исключено.

Дафнии одного возраста помещались на несколько секунд в водную среду, содержащую 10 мг/л фенола. Это приводило к уменьшению их сердечного ритма с 7 до ~2 Гц. Затем дафнии помещались в разные колбы с одинаковым объемом водной среды без фенола. Функциональное состояние дафнии контролировалось с помощью видеосистемы, описанной в разделе 5.2 [252].

Все эксперименты проводились при постоянной температуре воздуха на поверхности воды 22°C. Предварительно подвергнутые отравляющему действию фенола дафнии на 10-й минуте в трех группах имели частоту сердцебиения 1,2 Гц. Уже на 15-й минуте дафнии, которые подвергались воздействию потока атмосферного воздуха, как облученного, так и не облученного, отличались от контрольной группы по частоте сердцебиений на

0,6Гц (рис.56), а на 40-й и 45-й минуте соответственно восстанавливали исходный уровень сердцебиения. При этом процесс восстановления сердечного ритма у дафний, подвергнутых воздействию «облученного» воздуха, происходил наиболее интенсивно. В то же время для контрольной группы восстановление сердечного ритма происходило наиболее медленно, а именно: для достижения восстановления требовалось 85 минут.

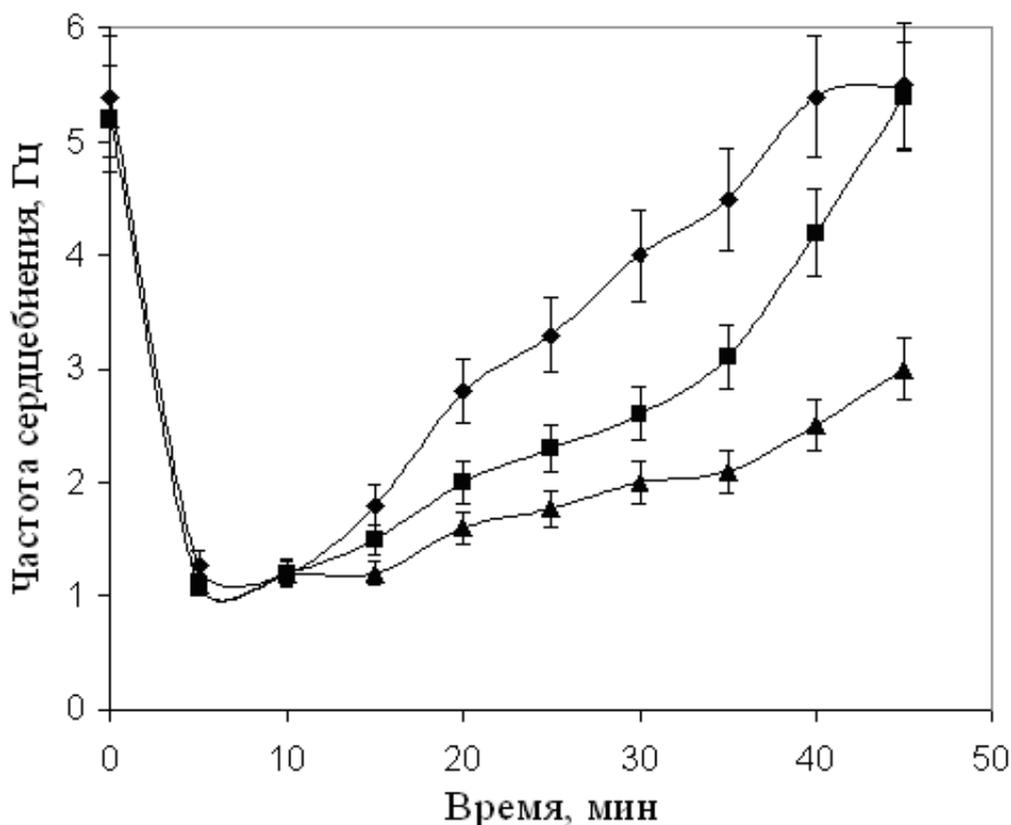


Рис. 56. Результаты эксперимента: \blacklozenge – облученный воздух, \blacksquare – не облученный воздух, \blacktriangle – контроль

Результаты приведенных исследований открывают возможность для проведения исследований воздействия различных газов, аэрозолей, лекарственных сред на живые объекты [146], а также отработки новых направлений в биомедицинских технологиях, в частности терагерцовой аэротерапии.

6.4. Воздействие переменного магнитного поля и электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот на функциональное состояние дафнии

Ранее уже было рассмотрено воздействие низкоинтенсивного электромагнитного излучения на частотах спектра атмосферного кислорода на дафнию, находящуюся в водной среде. Выявлено, что дафния, предварительно подвергнутая воздействию фенола, восстанавливает свой сердечный ритм быстрее контрольной при облучении ее электромагнитным излу-

чением ТГц-диапазона (129 ГГц – частота второй зоны поглощения атмосферного кислорода). Из результатов исследований зависимости сдвига частоты сердечных сокращений от концентрации фенола при одновременном воздействии переменного магнитного поля частотой 4–5 Гц и амплитудой 25 мТл в течение 1 часа, приведенных в работе [251,254–256], следует, что при малых концентрациях фенола действие магнитного поля преобладает над воздействием химического фактора, и только при концентрациях фенола больших 8 мг/л влияние магнитного поля «подавляется» фенолом.

В связи с этим представляет интерес исследование изменения частоты сердцебиений дафнии (*Daphnia magna* Straus), предварительно подвергнутой воздействию фенола, при последующем одновременном действии переменного магнитного поля и ЭМИ ТГц-диапазона [257].

Действие излучения на функциональное состояние дафнии фиксировалось по изменению частоты ее сердечного ритма с помощью установки, показанной на рис.57. Генератор имитировал одну из линий молекулярного спектра поглощения атмосферного кислорода $129 \pm 0,2$ ГГц. Облучение осуществлялось с помощью прямоугольного рупора 15 (см. рис. 57).

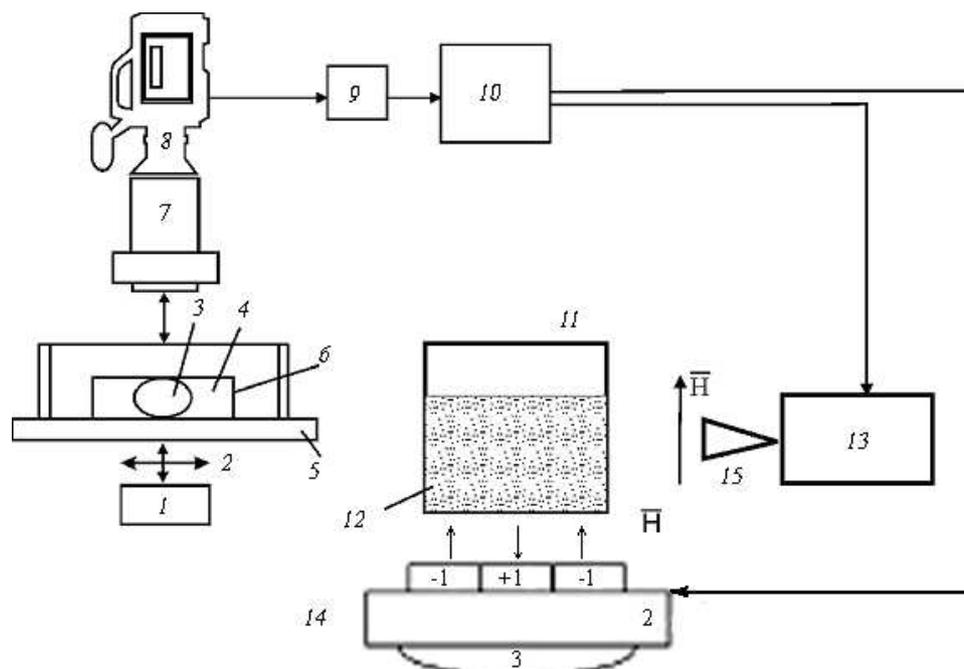


Рис. 57. Установка для исследования воздействия переменного магнитного поля и электромагнитного излучения ТГц-диапазона на функциональное состояние дафнии: 1 – источник света; 2 – линза; 3 – дафния; 4 – камера для дафнии; 5 – прозрачный столик; 6,7 – микроскоп; 8 – видеокамера; 9 – плата видеоввода; 10 – компьютер; 11 – кювета с водной средой; 12 – водная среда с дафнией; 13 – терагерцовый генератор; 14 – устройство для создания переменного магнитного поля; 15 – волноводно-лучевой переход и квазиоптический лучевод

Для создания переменного магнитного поля на частотах 5–6 Гц источником поля служил вращающийся диск 14 диаметром 25 см, на котором

радиально были прикреплены чередующиеся по полярности постоянные магниты с осью намагничивания, перпендикулярной плоскости диска. Помещенный непосредственно под кювету 11 с дафнией и водной средой 12 диск вращался с помощью электродвигателя в горизонтальной плоскости с фиксированной скоростью, обеспечивая наличие в любой точке рабочей камеры переменное поле заданной частоты. Кювета была изготовлена из полипропилена, имела толщину стенки около 0,5 мм и практически не вносила ослабления переменного магнитного поля и ЭМИ на частоте 129 ГГц. Амплитуда магнитного поля H внутри кюветы вблизи ее дна составляла 25 мТл.

Предварительно отобранные дафнии одного возраста помещались на 5 минут в раствор фенола различной концентрации (8 или 10 мг/л), после чего дафнии помещались в колбы с одинаковым объемом водной среды без фенола (рис. 58 и 59 соответственно).

Для исследования влияния магнитного поля дафнию, находящуюся в водной среде, подвергали воздействию переменного магнитного поля в течение 1,5 часов.

Для исследования воздействия электромагнитного излучения каждая дафния, находящаяся в водной среде, подвергалась воздействию ЭМИ мощностью 2 мкВт на частоте второй области молекулярного поглощения атмосферного кислорода ~ 129 ГГц.

Были проведены также исследования изменения частоты сердечных сокращений дафнии при одновременном воздействии переменного магнитного поля и низкоинтенсивного электромагнитного поля. Для этого соблюдалось условие: вектор H , параллельный широкой стенке волновода, был коллинеарен вектору H постоянных магнитов.

В течение первых пяти минут после помещения всех дафний в водную среду без фенола частота сердечных сокращений у них уменьшалась до минимального значения как результат воздействия фенола. Различие в сдвиге ЧСС дафний подверженных воздействию только ГГц-излучения от группы помещенных еще и в магнитное поле становится заметным через 35 минут после начала эксперимента.

Затем наблюдался процесс восстановления сердечного ритма. Воздействие в течение часа только магнитного поля приводит к тому, что ЧСС дафний достигает на 50% больших значений, чем в отсутствии воздействия (у контрольной группы). Воздействие только терагерцового излучения резко интенсифицирует процесс восстановления сердечного ритма. Однако в этом случае примерно через 30 минут после начала воздействия частота сердечного ритма, не достигая значения, характерного для состояния до воздействия фенола, вновь начинает уменьшаться. Наибольший уровень восстановления частоты сердечного ритма наблюдается при одновременном воздействии терагерцового излучения и магнитного поля в течение примерно 60 мин. При дальнейшем такого рода воздействии вновь проявляется тенденция к уменьшению ЧСС. Отметим, что максимальный сдвиг

ЧСС при этом составил 4,5 Гц, что на 0,6 Гц больше, чем при воздействии на дафний только ТГц-излучения.

При проведении измерений для контрольной группы наблюдался разброс в изменении частоты сердцебиений $\pm 0,1$ Гц.

Таким образом, воздействие ТГц-излучения на одной из частот спектра поглощения атмосферного кислорода замедляет ритм сердцебиений здоровой дафнии, который через некоторое время вновь восстанавливается.

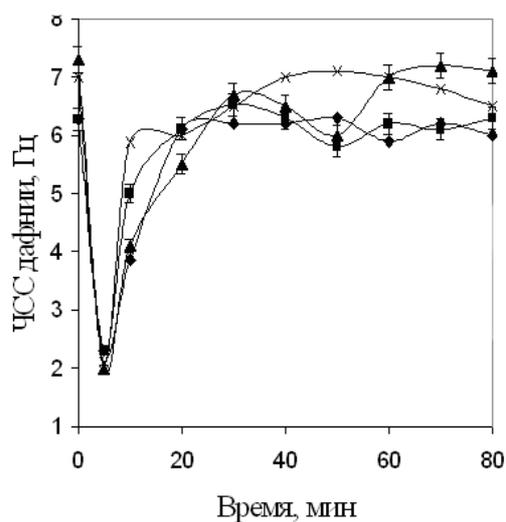


Рис. 58. Зависимость частоты сердцебиения дафнии, предварительно помещенной в 8 мг/л раствор фенола, от времени воздействия ТГц-излучения и магнитного поля: \blacklozenge – контроль, \blacksquare – ЭМИ ТГц \blacktriangle – магнитное поле, \blackcross – ЭМИ ТГц совместно с магнитным полем

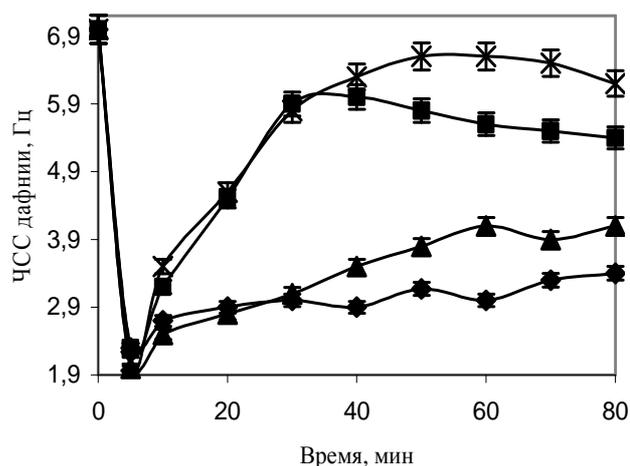


Рис. 59. Зависимость частоты сердцебиения дафнии, предварительно помещенной в 10 мг/л раствор фенола, от времени воздействия ТГц-излучения и магнитного поля: \blacklozenge – контроль, \blacksquare – ЭМИ ТГц \blacktriangle – магнитное поле, \blackcross – ЭМИ ТГц совместно с магнитным полем

Одновременное воздействие ТГц-излучения на частоте поглощения атмосферного кислорода 129 ГГц и магнитного поля практически полностью восстанавливают ЧСС дафний, предварительно помещенных в раствор фенола за 60 минут, в отличие от ситуации, когда воздействует только один фактор: магнитное поле или ТГц-излучение. Полученные результаты могут быть положены в основу при выработке рекомендаций для использования воздействия излучения различной природы в качестве лечебных процедур [258].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Бинги В.Н., Савин. А.В.* Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы // УФН. 2003. Т. 177, № 3. С. 265–300.
2. *Кикнадзе Г.С., Есаков Б.П., Кузьминых С.Б., Комаров В.М.* Опыт оценки степени загрязнения водной среды по изменениям периода биения сердца дафнии // Науч. центр биол. исслед. АН СССР. Пущино, 1983. 13 с.
3. *Семихина Л.П.* Изменение показателя преломления воды после магнитной обработки // Коллоид. журн. 1981. Т. 43, вып. 2. С. 401–404.
4. *Киселев В.Ф., Салецкий А.М., Семихина Л.П.* Динамика жидкой воды и проблема слабых воздействий // Биофизика. 1999. Т. 44, вып. 6. С. 1136–1144.
5. *Петросян В.И., Синицин Н.И., Елкин В.А., Башкатов О.В.* Взаимодействие водосодержащих сред с магнитными полями // Биомед. радиоэлектроника. 2000. Вып. 2. С. 10–18.
6. Реакции биологических систем на магнитное поле: Сб. науч. тр. / Под ред. Ю.А. Холодова. М., 1978, 216 с.
7. *Холодов Ю.А.* Мозг в электромагнитных полях. М., 1982. 120 с.
8. *Холодов Ю.А.* Влияние электромагнитных и магнитных полей на центральную нервную систему. М, 1966. 284 с.
9. Биологические механизмы и феномены действия низкочастотных и статических электромагнитных полей на живые системы // Материалы Всесоюз. симпозиума / Под ред. Г.Ф. Плеханова. Томск, 1984. 158 с.
10. Материалы Третьего Всесоюзного симпозиума по влиянию магнитных полей на биологические объекты / Под ред. А.С. Васильева. Калининград, 1975. 240 с.
11. Магнитное поле в медицине: Влияние искусственных магнитных полей на биологические объекты: Материалы к симпозиуму / Под ред. Ю.А. Холодова и З.М. Абдуллиной. Фрунзе, 1974. 172 с.
12. *Сидякин В.Г.* Влияние глобальных экологических факторов на нервную систему. Киев, 1980. 160 с.
13. *Сидякин В.Г., Темурьянц Н.А., Макеев В. Б.* Космическая экология. Киев, 1985. 176 с.
14. *Абдуллина З.М.* Биологическое действие магнитных полей на живой организм. Фрунзе, 1975. 168 с.
15. *Аминев Г.А.* Влияние постоянного магнитного поля на некоторые тормозные процессы: Автореф. дис.... канд. биол. наук. Пермь, 1966. 22 с.
16. *Холодов Ю.А.* Реакции нервной системы на электромагнитные поля. М., 1975. 206 с.
17. *Холодов Ю.А., Шишло М.А.* Электромагнитные поля в нейрофизиологии. М., 1979. 168 с.
18. Магнитобиология и магнитотерапия в медицине: Тез. докл. Всесоюз. науч.-практ. конф. (1–3 октября 1980 г.). Витебск, 1980. 249 с.
19. Материалы Второго Всесоюзного совещания по изучению влияния магнитных полей на биологические объекты (24–26 сентября 1969 г.). М., 1969. 281 с.
20. Применение магнитных полей в клинике. Куйбышев, 1976. 206 с.

21. Эджи У. Р. Кооперативные механизмы восприимчивости мозговой ткани к внешним и внутренним электрическим полям // Физиология человека. 1975. Т. 1. С. 59–68.
22. Влияние солнечной активности на биосферу // Проблемы космической биологии. М., 1982. Т. 43. 233 с.
23. Влияние электромагнитных полей на биологические объекты // Тр. Крымск. мед. ин-та. Харьков, 1973. Т. 53. 84 с.
24. Магнитное поле и жизнедеятельность организмов // Проблемы космической биологии. М., 1978. Т. 37. 266 с.
25. Tenforde T.S., Gaffey C.T., Moyer B.R., Budinger T.F.. Cardiovascular alternations in Macaca Cynomolus monkeys exposed to stationary magnetic fields: Experimental observations and theoretical analysis // Bioelectromagnetic. 1983. № 4(1). P. 1–10.
26. Tenforde T. S. Magnetic field applications in modern technology and medicine // Biological effects of static and ELE magnetic fields. Munich, 1986. P. 21–36.
27. Tenforde T. S., Gaffey C. T. Rayborn Influence of stationary magnetic fields on ionic conduction processes in biological systems // Electromagnetic compatibility: 6th symp. on electromag. exhibition on electromag. compatibility. Zurich, 1985. P. 205–210.
28. Асанова Т.П., Раков А.Н. Состояние здоровья работающих в электрическом поле открытых распределительных устройств 400-500 кВ // Гигиена труда и профзаболеваний. 1966. № 5. С. 50–52.
29. Владимирский Б.М., Кисловский А.Д. Солнечная активность и биосфера. М., 1982. 62 с.
30. Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли: Сб. тр./Отв. ред. М.Н. Гневышев и А.И. Оль. М., 1971. 318с.
31. Gavallas-Medici R.J., Day-Magdaleno S.R. Extremely low frequency, weak electric fields effect schedule-controlled behavior of monkeys// Nature. 1978. Vol. 261. P. 256–257.
32. Silny Y. Influence of low-frequency magnetic field (LMF) on the organism // Proc. 4th EMC Symp. Zurich, 1981. P. 175–180.
33. Макеев В.Б. Экспериментальное исследование физиологического действия электромагнитных полей инфранизкой частоты на систему крови животных: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Симферополь, 1979. 23 с.
34. Материалы II межвузовского семинара по актуальным вопросам магнитобиологии (27–30 мая 1979 г.). Симферополь, 1979. С.120.
35. Прохватило С. В., Швайко И. И. Изменение функции щитовидной железы при воздействии электрического поля промышленной частоты // Гигиена населенных мест. Киев, 1975. Вып. 14. С. 126–131.
36. Физико-математические и биологические проблемы действия электромагнитных полей и ионизации воздуха: Материалы Всесоюз. науч.-техн. симпозиума: В 2 т./Под ред. Н. В. Красногорской. М., 1975. Т. 2. 207 с.
37. Дышловой В.Д., Качура В.С. Влияние электромагнитных полей промышленной частоты на организм человека и биологические объекты. Киев, 1977. 20 с.
38. Le Bars A.G. Biological effects of electric fields on rats and rabbits // Red. Gen. Elect. N.Y., 1976. P. 91–97.
39. Броун Г. Р., Ильинский О. Б. Физиология электрорецепторов Л., 1984. 247 с.
40. Применение магнитных полей в клинической медицине и эксперименте: Тез. докл. на 2-й Поволж. конф. Куйбышев, 1979. 256 с.
41. Электромагнитные поля в биосфере: В 2 т. / Под ред. Н. В. Красногорской. М., 1984. Т. 1: Электромагнитные поля в атмосфере Земли и их биологическое значение. 375 с.; Т. 2: Биологическое действие электромагнитных полей. 326 с.
42. Колодуб Ф.А. Биохимические механизмы действия переменных магнитных полей низких частот и их использование при гигиеническом нормировании и патогенетической профилактике: Автореф. дис... д-ра биол. наук. М., 1981. 22 с.

43. Актуальные вопросы магнитобиологии и магнитотерапии: Материалы республ. науч.-практ. конф. / Отв. ред. А. Ф. Муравьев, В. Н. Савельев. Ижевск, 1981. 199 с.
44. Удинцев Н. А., Канская Н. В. Влияние магнитных полей на сердце. Томск, 1977. 125 с.
45. Удинцев Н. А., Мороз В. В. О механизме реакции гипофизарно-надпочечниковой системы на стрессовое действие переменного магнитного поля // Патол. физиология и эксперим. терапия. 1976. № 6. С. 72–74.
46. Удинцев Н. А., Хлынин С. М. Влияние магнитных полей на семенники. Томск, 1980. 125 с.
47. Wever R. The effects of electric fields on circadian rhythms in men // Life Sci. and Space Res. 1970. Vol.34. P. 177–187.
48. Биологическое действие электромагнитных полей: Тез. докл. Всесоюз. симп. Пущино, 1982. 167 с.
49. Влияние магнитных полей на биологические объекты: Сб. науч. работ / Под ред. Ю. А. Холодова. М., 1971. 215 с.
50. Забродина Л.В. Действие постоянных магнитных полей на свертывающую систему крови в эксперименте: Автореф. дис... канд. мед. наук. М., 1972. 22 с.
51. Маркузе И.И., Амбарцумян Р. Г., Чибрикин В. М., Пирузян Л. А. Исследование действия постоянного магнитного поля на изменение концентрации электролитов крови и органов животных // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1973. № 2. С. 281—286.
52. Соловьев И.А. О биологическом действии электрической составляющей электромагнитного поля низкой частоты // Тр. ВНИИМИО. 1962. № 5–6. С. 86–94; 82–91.
53. Плеханов Г. Ф. Экологическая роль внешних электромагнитных полей // Проблемы солнечно-земных связей. Новосибирск, 1982. С. 10–16.
54. Влияние естественных и слабых искусственных магнитных полей на биологические объекты: Материалы Второго Всесоюз. симп. / Под ред. М.П. Травкина. Белгород, 1973. Т. 22. 173 с.
55. Живые системы в электромагнитных полях: Сб. науч. тр./ Под ред. Г.Ф. Плеханова. Томск, 1979. Вып. 2. 180 с.
56. Мочалкин Л. И., Рик Г. Р., Батыгин Н. Ф. К вопросу о влиянии магнитного поля на биологические объекты // Тр. по агр. физике. М., 1962. Вып. 10. С. 48–50.
57. Материалы Всесоюзного симпозиума по влиянию искусственных магнитных полей на живые организмы. Баку, 1972.
58. Нахильницкая З. Н., Смирнова Н. П. Влияние ЭМП на животный организм // Экологическая физиология человека. М., 1979. С. 496–515.
59. Coleman M., Bell J., Skeet R. Leukemia incidence in electrical workers // Lancet. 1983. Vol.8331. P. 982–983.
60. Проблемы экспериментальной и практической электромагнитобиологии: Сб. науч. тр. / Под ред. И. Г. Акоева и В. В. Тяжелова. Пущино, 1983. 150 с.
61. Броун Г.Р. Механизмы электрической и неэлектрической чувствительности ампулированных электрорецепторов: Автореф. дис... д-ра биол. наук. Л., 1984. 21 с.
62. Протасов В. Р. Биоэлектрические поля в жизни рыб. М., 1972. 228 с.
63. Савин Б.М. Гигиеническое нормирование неионизирующих излучений // Гигиеническое нормирование факторов производственной среды и трудового процесса. М., 1986. С. 115–146.
64. Браун Ф. Биологические ритмы // Сравнительная физиология животных. 1977. Т. 2. С. 210—260.
65. Palmer J. D. Organismic spatial orientation in very weak magnetic fields // Nature. 1963. Vol. 198. P. 1061–1062.
66. Brown F. A. Gr., Park Y. H. Association formation between light and subtle geophysical fields // Biol. Bull. 1976. Vol. 132. P. 311–319.

67. *Kirschvink J. L., Gould J. L.* Biogenic magnetite as a basis for magnetic field detection in animals // *Biosystem.* 1981. Vol. 13. P. 181–201.
68. *Zoeger Y., Dunn Y. B., Fuller M.* Magnetic material in the head of the common pacific dolphin // *Science.* 1981. Vol. 213, № 4510. P. 892–894.
69. *Павлович С. А.* Магнитная восприимчивость организмов. Минск, 1985. 109 с.
70. *Павлович С. А.* Магниточувствительность и магнитовосприимчивость микроорганизмов. Минск, 1981. 172 с.
71. *Balkwill D., Maratea D., Blacemdre R.* Ultrastructure of magnetotactic spirillum // *J. Bacteriol.* 1980. Vol. 141. P. 1399–1401.
72. *Blakemore R. P.* Magnetotactic bacteria // *Science.* 1985. Vol. 35. P. 445–455.
73. *Blakemore R. P., Franke R. B., Kalmijin A. J.* South-seeking magnetotactic bacteria in the southern hemisphere // *Nature.* 1980. Vol. 286, № 5771. P. 384–385.
74. *Frankel R. B., Blakemore R. P.* Navigation compass in magnetic bacteria // *J. Magn. Mater.* 1980. Vol. 15–18. P. 1562–1564.
75. *Frankel R. B., Blakemore R. P., Aranjó F. F.* Magnetotactic bacteria at the geomagnetic equator // *Science.* 1981. Vol. 212, № 4500. P. 1269–1270.
76. *Maratea D., Blakemore R. P.* Aquaspirillum magnetotacticum new species a magnetic spirillum // *Intern. J. Syst. Bacteriol.* 1981. Vol. 31, №4. P. 452–555.
77. *Aarholt E., Flinn E. A., Smith S. W.* Effects of low-frequency magnetic fields on bacterial growth rate // *Phys. med. and Biol.* 1981. Vol. 26, № 4. P. 613–621.
78. Применение магнитных полей в медицине, биологии и сельском хозяйстве: Сб. тр. межвуз. тем. конф. / Под ред. С.Н. Ивановой. Саратов, 1978. 198 с.
79. Актуальные вопросы медицинской магнитобиологии. Саранск, 1977. 168 с.
80. *Russel D. N., Webb S. Y.* Metabolic response of *Danaus archippus* and *Saccharomyces cerevisiae* to weak oscillatory magnetic fields // *Intern. J. Biometeorol.* 1981. Vol. 25. P. 257–262.
81. Биологические ритмы: Проблемы космической биологии. М., 1980. Т. 41. 319 с.
82. *Опалинская А. М., Агулова Л. П.* Влияние естественных и искусственных электромагнитных полей на физико-химическую и элементарную биологическую системы (Экспериментальные исследования). Томск, 1984. 190 с.
83. *Плеханов Г. Ф., Орлов В. М., Карташев А. Г.* Изучение влияния электрического поля высоковольтных установок на некоторые компоненты биогеоценоза // *Экология.* 1988. № 2. С. 78–80.
84. *Lusbigman B. K., Isquith J. R.* The enhanced lethality of *Paramecium* in dyes under the influence of magnetic fields // *Acta Protozoologica.* 1975. Vol. 13. P. 257–266.
85. *Аносова М. Г.* Влияние медленно меняющихся во времени по линейному закону магнитных полей малой напряженности на продукцию фага в лизогенной системе *E. coli* К-12: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 1975. 22 с.
86. *Червинец В.М.* Характеристика изменчивости бактерий в условиях моделирования пульсации геомагнитного поля: Автореф. дис... канд. мед. наук. Л., 1981. 21 с.
87. *Barnothy M. F.* Biological effects of magnetic fields // N.Y. Plenum Press. 1964. Vol. 1. P. 287.
88. *Павлова Р. Н.* Биохимические изменения в органах и тканях животного при действии слабого низкочастотного электромагнитного поля: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Л., 1976. 19 с.
89. *Бучаченко А. Л., Сагдеев Р. З., Салихов К. М.* Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. Новосибирск, 1978. С. 284.
90. *Бельский А. И.* Влияние электромагнитного поля на рост и развитие растений // *Электронная обработка материалов.* 1977. № 6. С. 69–71.
91. *Вайнер Л. М., Подоплелов А. В., Лешина Т. В. и др.* Влияние магнитного поля на скорость разложения H_2O_2 каталазой и комплексом ЭДТА с Fe^{3+} // *Биофизика.* 1978. Т. 23, вып. 2. С. 234–241.

92. *Ванаг В.К.* Действие постоянного магнитного поля на некоторые типы ферментативных реакций: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1985. 18 с.
93. *Maling J. E., Weissbluth M., Yakobs E. E.* Enzyme substrate reactions in the high magnetic fields // *Biophys. Journ.* 1965. Vol. 5, № 6. P. 767–776.
94. *Эйди У. Р.* Кооперативные механизмы восприимчивости мозговой ткани к внешним и внутренним электрическим полям // *Физиология человека.* 1975. Т. 1. С. 59–68.
95. *Adey W. R.* Tissue interactions with non-ionizing electromagnetic fields // *Physiol. Rev.* 1981. Vol. 61. P. 435–514.
96. *Bawin S. M., Adey W. R.* Sensitivity of calcium binding in cerebral tissue to wear environmental electric fields oscillating at low frequency // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 1976. Vol. 73. P. 1999–2003.
97. *Дышловой В. Д., Панчук А.С., Качура В.С.* Влияние электромагнитного поля промышленной частоты на характер роста и митотическую активность фибробластоподобных клеток человека // *Цитология и генетика.* 1981. Т. 15, № 3. С. 9–12.
98. *Ковалев С.П.* Влияние электромагнитного поля промышленной частоты на процессы биосинтеза белков эмбриональными фибробластами в культуре ткани // *Цитология.* 1981. Т. 22, № 4. С. 487–492.
99. *Внукова З. Е.* Реакция культур клеток млекопитающих на воздействие ПМП напряженностью 1000 и 3000 Э // *Космическая биология и авиакосмическая медицина.* 1978. Т. 12. С. 47–51.
100. Живые системы в электромагнитных полях: Сб. науч. тр./ Под ред. Г.Ф. Плеханова. Томск, 1981. Вып. 3. 168 с.
101. *Класен В.И.* Омагничивание водных систем. М., 1978. 240 с.
102. Влияние магнитных полей на биологические объекты: Материалы 3-го Всесоюз. симп. Калининград, 1975. 240 с.
103. Влияние магнитных полей на биологические объекты: Сб. М., 1971. 117 с.
104. *Бурлакова Е.Б., Конрадов А.А., Худяков И.В.* Воздействие химических агентов в сверхмалых дозах на биологические объекты // *Изв. АН СССР. Сер. биол.* 1990. № 2. С. 184–193.
105. Biological and clinical applications on ultra low dozes// *Abstr. Intern. Congress on ultra low dozes.* Sept. 20–22. Bordeaux, 1990.
106. *Бурлакова Е.Б.* Эффект сверхмалых доз // *Вестн. Н. РАН.* 1994. Т. 64, № 5. С. 425–431.
107. *Сазанов Л.А., Зайцев С.В.* Действие сверхмалых доз (10^{-18} – 10^{-14} М) биологически активных веществ: общие закономерности, особенности и возможные механизмы // *Биохимия.* 1992. Т. 57, № 10. С. 1443–1460.
108. *Горбатова Е.Н., Духович Ф.С., Курочкин В.К.* // Механизмы действия сверхмалых доз: Тез. II межд. симп. М., 1995.
109. *Haley R.W.* Is there a Gulf War Syndrom // *Searching for Syndromes by Factor Analysis of Symptoms.* e.a. *JAMA.* 1997. Vol. 277, №3. P. 215–222.
110. *Духанин В.С.* Биохимические изменения в органах и тканях животного при действии слабого низкочастотного электромагнитного поля: Автореф дис. ... канд. М., 1973. 38 с.
111. *Миненко В.И., Петров С.М., Миц М.Н.* Магнитная обработка воды. Харьков, 1962. 39 с.
112. *Файзуллаев Д.Ф., Джурабеков С., Шакиров А.А., Абидов С.* Влияние магнитного поля // *Докл. АН УзССР.* 1968. № 8. С. 13–15; 1969. № 8. С. 10–11.
113. Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем: Сб. Второго Всесоюз. совещания. М., 1971. 316 с.
114. *Зеленков В.Е., Мусина А.А., Кульсартов В.К.* Очистка сточных и проточных вод предприятий цветной металлургии // *Тр. Ин-та «Казмеханобр».* Алма-Ата, 1974. №13. С. 214–219.

115. Райгородский Ю.М., Серянов Ю.В., Лепилин А.В. Форетические свойства физических полей и приборы для оптимальной физиотерапии в урологии, стоматологии и офтальмологии. Саратов, 2000. 272 с.
116. Креницкий А.П., Майбородин А.В., Туикин В.Д. и др. Терагерцовые волны и перспективы развития терагерцовых биомедицинских технологий // Физика волн. процессов и радиотехн. системы. 2005. Т.8, №1. С.61–68.
117. *Betskyi O.V., Kislov V.V., Krenitskiy A.P. et al.* Terahertz waves and perspectives of development of terahertz biomedical technologies // IRMMW-THZ Conference 2005 – The Joint 30th Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, September 19–23, 2005, Crowne Plaza Williamsburg at Fort Magruder Hotel Williamsburg, Virginia, Virginia USA, Paper ID: TC5-3. P. 1234–1235.
118. Бецкий О.В., Яременко Ю.Г. Миллиметровые волны и перспективные области их применения // Зарубежная радиоэлектроника. 2002. № 5. С.19–28.
119. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М., 1991. 1232 с.
120. Жевакин С.А., Наумов А.П. Расчет коэффициента поглощения сантиметровых и миллиметровых волн в атмосферном кислороде // Радиотехника и электроника. 1965. №6. С.987–995.
121. Майбородин А.В., Креницкий А.П., Бецкий О.В. Электродинамическая модель взаимодействия КВЧ-волн и атмосферного воздуха в дыхательной системе // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2002. № 5–6. С.15–26.
122. Креницкий А.П., Майбородин А.В. КВЧ-аэротерапия – новый, природный, естественный, экологически чистый метод лечения // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2002. № 4(28). С.15–26.
123. *Hardjiloucas S., Karatzas L. S., John W. Bowen* Measurements of Leaf Water Content Using Terahertz Radiation // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1999. Vol. 47, №. 2. P.5–23.
124. Гершензон Е.М., Голант М.Б., Негирев А.А., Савельев К.С. Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Под ред. Н.Д. Девяткова. М., 1985. 135с.
125. Гершензон Е.М. Субмиллиметровая спектроскопия // Сорос. образоват. журн. 1998. №4. С.78–85.
126. Гольцман Г.Н. Горячие электроны в резистивном состоянии сверхпроводника – новое физическое явление, новая техника в электронике, радиофизике и оптике // Сорос. образоват. журн. 1996. №4. С.90–96.
127. Ирисова Н.А. Метрика субмиллиметровых волн // Вестн. АН СССР. 1968. №10. С. 63–71.
128. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М., 1989. 544с.
129. Казначеев В. П., Михайлова Л. П. Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей. Новосибирск, 1985. 182 с.
130. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М., 1984. 432 с.
131. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М., 1987.
132. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Эффект синхронизации внешним электрическим полем частоты сердцебиений дафнии // Письма в ЖТФ. 1999. Т.25, вып.4. С.74–78.
133. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Вагарин А.Ю. Лазерная автодинная интерферометрия динамических параметров биообъектов // Письма в ЖТФ. 1998. Т.24, вып.5. С. 39–43.

134. *Бреслер С.Е.* Биофизика мембран // Проблемы современной физики / Под ред. А.П. Александрова. Л., 1980. С. 535 – 552.
135. *Чемерис Н.К., Сафронова В.Г.* Слабое низкочастотное магнитное поле инициирует частотно-зависимые флуктуации периода сокращений сердца *Daphnia magna* // Биофизика. 1993. Т.38, №3. С. 511–519.
136. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Вагарин А.Ю. и др.* Лазерная автодинная интерферометрия динамических параметров биообъектов // Письма в ЖТФ. 1998. Т.24, вып.5. С. 39–43.
137. *Кочнев И.Н.* Динамика жидкой воды и проблема слабых воздействий // Биофизика. 1999. Т.44, №6. С. 1136–1144.
138. *Новиков В.В., Шейман И.М., Фесенко Е.Е.* Влияние слабых и сверхслабых магнитных полей на интенсивность бесполого размножения планарий // Биофизика. 2002. Т. 47, № 1. С. 125–129.
139. *Пресман А.С.* Электромагнитные поля и процессы регулирования в биологии // Вопросы бионики. М., 1967. 596 с.
140. *Бецкий О.В., Девятков Н.Д.* Механизмы взаимодействия электромагнитных волн с биологическими объектами // Радиотехника. 1996. Т. 41, № 9. С. 4–11.
141. Миллиметровые волны и фотосинтезирующие организмы / Под ред. Ю.В. Гуляева, А.Х. Тамбиева. М., 2003.
142. *Поцелуева М.М., Пустовидко А.В., Евдотиенко Ю.В. и др.* Образование реактивных форм кислорода в водных растворах под действием электромагнитного излучения КВЧ-диапазона // Докл. АН. 1998. Т.359, №3. С.415–418.
143. *Голант М.Б., Брюхова А.К., Реброва Т.Б.* Некоторые закономерности действия электромагнитных излучений миллиметрового диапазона на микроорганизмы // Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине: Сб. докл. М., 1985.
144. *Belyaev I. Ya., Alipov Y.D., Shcheglov V.S. et al.* Cooperative response of *Escherichia coli* to the resonance effect of millimeter waves at super low intensity // *Electro Magnetobiol.* 1994. Vol.13. P.14–56.
145. *Шуб Г.М., Лунева И.О., Денисова С.Г., Островский Н.В.* Действие миллиметровых волн на бактерии в экспериментах *in vivo* и *in vitro* // Миллиметровые волны в медицине и биологии: Сб. докл. 10-го Рос. симп. с междунар. участ. М., 1995. С.28–32.
146. *Рытик А.П.* Воздействие электромагнитного излучения на частоте молекулярного поглощения атмосферного кислорода на прокариотические клетки в условиях термостатирования эксперимента // Тр. науч.-техн. конф. молодых специалистов/ ФГУП НПП «Контакт» 17–18 февр. Саратов, 2004. С.186–189.
147. *Шуб Г.М., Пронина Е.А., Креницкий А.П., Майборodin А.В. и др.* Воздействие электромагнитного излучения спектра поглощения молекулярного кислорода на рост прокариотических клеток // Миллиметровые волны в медицине и биологии: Сб. докл. 13-го Рос. симп. с междунар. участием. М., 2003. С.102–105.
148. *Шуб Г.М., Пронина Е.А., Креницкий А.П. и др.* Влияние электромагнитного излучения на частоте молекулярного спектра поглощения кислорода на динамику роста прокариотических клеток // Аллергология и иммунология. 2005. Т. 6, №2. С.208–209.
149. *Бережанская Л.Ю., Белоплотова О.Ю., Бережанский В.Н.* Влияние электромагнитного излучения КВЧ-диапазона на биолюминесценцию бактерий // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 1993. №2. С.25–30.
150. *Бережанская Л.Ю., Белоплотова О.Ю., Бережанский В.Н.* Влияние электромагнитных полей на активность биолюминесценции у бактерий // Биофизика. 1995. Т.40. С.35–38.

151. *Афромеев В.И., Субботина Т.Н., Яшин А.А.* О возможном корреляционном механизме активации собственных электромагнитных полей клеток организма при внешнем облучении // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 1997. № 9–10. С. 28–34.
152. *Гапонюк П.Я., Шерковина Т.Ю., Юркова Е.А. и др.* Сравнительное изучение клинической эффективности электромагнитных волн миллиметрового диапазона при облучении различных рефлекторных зон у больных с гастродуоденальными язвами // Миллиметровые волны в медицине: Сб. статей / Под ред. акад. Н.Д. Девяткова и проф. О.В. Бецкого. М., 1991. Т.1. С. 32–36.
153. *Алексеев А.А., Манкевич Л.Б., Голант М.Б.* Применение КВЧ-терапии в комбинированном лечении ортопедических больных // Миллиметровые волны в медицине: Сб. статей / Под ред. акад. Н.Д. Девяткова и проф. О.В. Бецкого. М., 1991. Т.1. С. 120–124.
154. *Алисов А.П., Алисова О.В., Григорина-Рябова Т.В. и др.* Миллиметровые волны в лечении гастродуоденальных язв // Миллиметровые волны в медицине: Сб. статей / Под ред. акад. Н.Д. Девяткова и проф. О.В. Бецкого. М., 1991. Т.1. С. 5–15.
155. *Андреев Е. А., Белый М. У., Ситько С. П.* Проявление собственных характеристических частот человеческого организма. Заявка 32-ОТ-10609 от 22 мая 1982 г. Комитет по делам изобретений и открытий СССР.
156. *Гапонюк П.Я., Столбиков А.Е., Шерковина Т.Ю. и др.* Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на биоэлектрическую активность периферических, центральных нервных структур и системную гемодинамику у больных гипертонической болезнью // Вопросы физиотерапии и курортологии. 1988. № 3. С.14–18.
157. *Ненашева Л.П., Галкин В.В., Голант М.Б. и др.* Влияние миллиметрового излучения низкой интенсивности на репопуляционный потенциал стволовых кроветворных клеток // Миллиметровые волны в медицине: Сб. статей / Под ред. акад. Н.Д. Девяткова и проф. О.В. Бецкого. М., 1991. Т.1. С.201–205.
158. *Кузьменко А.П., Соловьев И.Е., Тофан А.В.* Микроволновая резонансная терапия в профилактике и лечении парезов желудочно-кишечного тракта после операций на толстой кишке // Physics of the Alive. 2000. Vol. 8, №1. P.104–108.
159. *Грубник Б.П., Ситько С.П., Шалимов А.А.* Опыт применения технологии «Ситько-МРТ» для реабилитации онкологических больных III–IV стадии // Physics of the Alive. 1998. Vol.6, №1. P.97–102.
160. Радиационная медицина / Под ред. Ю.Г. Григорьева и В.С. Степанова: В 13 т. Т. 4. Гигиенические проблемы неионизирующих излучений. М., 1999. 304 с.
161. *Григорьев О.А., Меркулов А.В., Темников А.Г.* Оценка электромагнитной обстановки в районах размещения базовых станций системы сотовой связи // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. М., 1999. С.114–115.
162. *Григорьев Ю.Г., Степанов В.С., Григорьев О.А., Меркулов А.В.* Электромагнитная безопасность человека. М., 1999. 145 с.
163. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03. М., 2003.
164. *Gründler W., Keilmann F., Frohlich H.* Resonator growth rate responses of yeast cells irradiated by weak microwaves // Phys. Lett. 1977. Vol.62. P.213–222.
165. *Воронков В.Н., Завгородний С.В., Хижняк Е.П. и др.* Ультроструктурные изменения кожи мышей, вызванные КВЧ-облучением // Миллиметровые волны в медицине и биологии: Сб. докл. 11-го Рос. симпоз. с межд. участием. М., 1997. С.117–119.
166. *Пресман А.С.* Электромагнитные поля и процессы регулирования в биологии // Вопросы бионики. М., 1967. 596 с.

167. *Темурьянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.П.* Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. Киев, 1992. 188 с.
168. *Демецкий А.М., Алексеев А.Г.* Искусственные магнитные поля в медицине. Минск, 1981. 94 с.
169. *Ropp F.A.* Electromagnetic Control of Cell Processes // Interaction with Living System., 1979. P. 137–143.
170. *Усанов Д.А., Шишкин Г.Г., Скрипаль А.В., Усанов А.Д.* Влияние внешнего переменного магнитного поля на частоту сердцебиений пресноводного рачка – дафнию // Биомед. радиоэлектроника. 2001. Вып. 8. С.57–61.
171. *Фесенко Е.Е., Попов В.И., Новиков В.В., Хуцян С.С.* Структурообразование в воде при действии слабых магнитных полей и ксенона. Электронно-микроскопический анализ // Биофизика. 2002. Т. 47, вып. 3. С. 389–394.
172. *Кириш Ю.Д.* Поли-N-винилпирролидон и другие поли-N-виниламиды: синтез и физико-химические свойства. М., 1998. С. 252.
173. *Яновская Л.А., Умирзаков Б.К., Яковлев И.П и др.* Синтез и спектральные свойства винилогов халкона // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1971. №11. С.2427.
174. *Кузнецов П.Е., Рамазанов А.К., Усанов Д.А. и др.* Химические системы для индикации действия магнитного поля на воду // Биомед. технологии и радиоэлектроника. 2003. №1. С. 45–48.
175. *Иваницкий Г.Р., Медвинский А.Б., Цыганов М.А.* От беспорядка к упорядоченности – на примере движения микроорганизмов // УФН. 1991. № 161(4). С. 13–72.
176. *Глаголев А.Н.* // Усп. микробиол. 1983. № 18. С. 163.
177. *Adler J., Hazelbauer G.L., Dahl M.M. et al.* // J. Bacteriol. 1973. № 115. С. 824.
178. *Adler J.* Primitive Sensory and Communication Systems // The Taxes and Tropisms of Micro Organisms and Cells / Ed. M.J.Carlile. San Francisco, 1975.
179. *Tso W.W., Adler J. J.* // Bacteriol. 1974. № 118. P. 560.
180. *Macnab R.M., Koshland D.E.* // Mol. Biol. 1974. №84. P. 399.
181. *Taylor B.L., Koshland D.E.* // Bacteriol. 1975. № 123. P. 557.
182. *Lend F., Colombetti G.* // Ann. Rev. Biophys. and Bioengin. 1978. № 7. P. 341.
183. *Adler J.* // J. Gen. Microbiol. 1973. №74. P.77.
184. *Imae Y.* Sensing and Response in Microorganisms / Eds. M.Eisenbach, M.Balaban. Amsterdam, 1985.
185. *Miller J.B., Koshland D.E.* // J. Mol. Biol. 1977. №111. P. 183.
186. *Frankel R.B., Blakmore R.B.* // Bioelectromagnetics. 1989. №10. P. 323.
187. *Eisenbach M., Zimmerman J.R., Ciobotariu A. et al.* // Bioelectrochem. and Bioenerg. 1983. №10. P. 499.
188. *Plesset M.S., Whipple C.G., Winet H. et al.* // J. Theor. Biol. 1976. №59. P. 331.
189. *Kessler J.O.* // Comm. Theor. Biol. 1989. №1. P. 85.
190. *Harisch G., Dittmann J.* In Vivo and in Vitro Studies on the Efficiency of Potentized and Non-potentized Substances // Biomed. Therapy. 1997. Vol. 15(2). P. 40 – 46.
191. *Усанов А.Д.* Воздействие переменного электрического поля на колебательные движения глаза дафнии // Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2000: Материалы науч. шк. конф. Саратов, 2001. С. 162–168.
192. *Усанов А.Д.* Влияние одновременного воздействия нескольких факторов на сердцебиение дафнии // Стратегия взаимодействия микроорганизмов с окружающей средой: Материалы Первой регион. конф. молодых ученых. Саратов, 2002. С. 55–56.
193. *Скрипаль А.В., Усанов А.Д.* Синхронизация движений глаза дафнии внешним электрическим полем // Изв. вузов. Сер. Прикладная нелинейная динамика. 2000. Т. 8, №3. С.27–30.
194. *Usanov D.A., Skripal A.I., Skripal A.V. et al.* Laser diagnostics of daphnia oscillations // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4241. P.25–31.

195. *Ляпина Е.П., Усанов А.Д., Ляпин М.Н и др.* Дафния как экспериментальная модель для изучения особенностей действия гомеопатических препаратов // Биомед. технологии и радиоэлектроника. 2002. №10–11. С. 117–120.
196. *Ляпина Е.П., Усанов А.Д., Ляпин М.Н. и др.* Простая модель экспериментальной гомеопатии // Труды 57-го конгр. Междунар. мед. гомеопат. лиги. М., 2002. Т. 2. С.355–359.
197. *Усанов Д.А., Шишкин Г.Г., Скрипаль А.В и др.* Дафния как биоиндикатор электромагнитных воздействий на водную среду // Петербург. журн. электроники. 2002. № 4. С. 38–42.
198. *Усанов Д.А., Шишкин Г.Г., Скрипаль А.В., Усанов А.Д.* Воздействие переменных магнитных полей низкой интенсивности на частоту сердцебиений дафнии // Биомед. технологии и радиоэлектроника. 2003. №3. С.59–62.
199. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Панасенко В.И., Усанов А.Д.* Дафния как биоиндикатор электромагнитных воздействий на водную среду // Фундаментальные и прикладные аспекты функционирования водных экосистем: проблемы и перспективы гидробиологии и ихтиологии в XXI веке: Материалы Всерос. науч. конф. Саратов, 2001. С. 164–168.
200. *Лужников Е.А.* Клиническая токсикология: Учеб. пособие. М., 1982. 368 с.
201. *Бецкий О.В., Кислов В.В., Лебедева Н.Н.* Миллиметровые волны и живые системы. М., 2004. 272 с.
202. *Belyaev I.Y., Shcheglov V.S., Alipov E.D., Ushakov V.D.* Nonthermal Effects of Extremely High-Frequency Microwaves on Chromatin Conformation in Cells in Vitro-Dependence on Physical, Physiological, and Genetic Factors // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2000. Vol.48, № 11. P.15–26.
203. *Майбородин А.В., Креницкий А.П., Тупикин В.Д. и др.* Комплекс для исследований тонких структур молекулярных спектров физических и биологических сред. // Радиолокация, навигация, связь: 24–26 апреля. Воронеж, 2001. Т.1. С.609–614.
204. *Майбородин А.В., Креницкий А.П., Тупикин В.Д. и др.* Панорамно-спектрометрический комплекс для исследования тонких структур молекулярных спектров физических и биологических сред // Биомед. радиоэлектроника. 2001. № 8. С.6–15.
205. *Маляренко А.М., Фомин В.В.* Индуцированные столкновениями спектры поглощения простейших молекулярных систем // Спектральные проявления межмолекулярных взаимодействий в газах. Новосибирск, 1982. С.100–127.
206. *Люиселл У.* Излучение и шумы в квантовой электронике / Пер. с англ. М., 1972. С.93–104.
207. *Зилов В.Г., Судаков К.В., Эпштейн О.И.* Элементы информационной биологии и медицины. М., 2000. 248 с.
208. *Hadjiloucas S., Karatzas L.S., Bowen J.W.* Measurements of Leaf Water Content Using Terahertz Radiation // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1999. Vol.47, № 2. P.15–26.
209. *Переонов С.А.* Перспективы массового применения СВЧ-устройств // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1987. Вып.9. С.55–59.
210. *Колупаев Б.И.* Дыхание гидробионтов в норме и патологии. Казань, 1989. 190с.
211. *Быстров М.В., Заславский Г.Э., Кока Г.И.* Способ создания стимулирующего воздействия. А. с. 1650148, кл. А61 № 5/00, 1991.
212. *Krenitskiy A.P., Majborodin A.V., Rytik A.P.* The quasioptical terahertz molecular spectra generator of atmospheric gases radiation // The 3th Intern. Conf. on Comp. Electromagnetics and Its Applications. Nov. 1–4. Beijing, 2004.
213. *Быстров М.В.* Гармония техносферы и быта на основе универсальных «1/f флуктуаций» // Науч. приборостроение. 2001. Т. 11, № 4. С.88–89.

214. Майбородин А.В., Креницкий А.П., Бецкий О.В. Электродинамическая модель взаимодействия КВЧ-волн и атмосферного воздуха в дыхательной системе // Биомед. технологии и радиоэлектроника. 2002. №4. С.15–26.
215. Креницкий А.П., Майбородин А.В., Бецкий О.В. и др. Квазиоптический КВЧ-генераторный комплекс моделирования детерминированных шумов для биофизических исследования // Биомед. технологии и радиоэлектроника. 2003. № 2. С. 17–24.
216. Бендат Дж. Основы теории случайных шумов и ее применение / Пер. с англ. Ю.П. Леонова и др. М., 1965. С.68–75.
217. Пул Ч. Техника ЭПР-Спектроскопии / Пер. с англ.; Под ред. Л.Л. Декабруна. М., 1970. С.123–127.
218. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Под ред. В.Н. Дулина, М.С. Жука. М., 1977. С.34–36.
219. Яновский М.С. и др. Поляризационные аттенюаторы для квазиоптического тракта // Изв. ВУЗ СССР. Сер. Радиоэлектроника. 1974. Т.17, №9. С.49–54.
220. Креницкий А.П., Курчатова Ю.А., Майбородин А.В. и др. Функциональные устройства СВЧ-, КВЧ- и субмиллиметрового диапазона // Радиотехника. 2003. №2. С.79–93.
221. Mickan S., Abbott D., Munch J. et. al. Analysis of system trade-offs for terahertz imaging // Microelectronics. 2000. Vol. 31. P.503–514.
222. Князьков Б.Н., Яновский М.С. Делитель луча для квазиоптической линии передачи. А. с. 3400352, 1970.
223. Афсар М.Н., Батон К.Дж. Измерение диэлектрических характеристик материалов в диапазоне миллиметровых волн // ТИИЭР. 1985. Т.73, №1. С.143–167.
224. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот. М., 1965. С.100–115.
225. Девятков Н.Д., Голант Н.Б., Бецкий О.В. ММ-волны и их роль в процессах жизнедеятельности. М., 1991. 168 с.
226. Киричук В.Ф., Волин М.В., Паршина С.С., Старостина Н.В. Характеристика изменений функциональной активности тромбоцитов больных нестабильной стенокардией под влиянием ЭМИ миллиметрового диапазона в условиях *in vitro* // Миллиметровые волны в биологии и медицине: Сб. докл. XII Рос. симпоз. с междунар. участием. М., 2000. С. 99–101.
227. Бецкий О.В. Механизмы воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биологические объекты (биофизический подход) // Миллиметровые волны в медицине и биологии: Материалы XI Рос. симпоз. с междунар. участием. М., 1997. С.135–137.
228. Северина И.С. Растворимая форма гуанилатциклазы в молекулярном механизме физиологических эффектов окиси азота и в регуляции процесса агрегации тромбоцитов // Бюл. эксперимент. биологии и медицины. 1995. № 3. С.230–235.
229. Петросян В.И., Сеницын Н.И., Елкин В.А. и др. Проблемы косвенного и прямого наблюдения резонансной прозрачности водных сред в миллиметровом диапазоне // Электрон. пром-ть. 2000. №1. С.99–103.
230. Габбасов В.А., Попов Е.Г., Гаврилов И.Ю. и др. Новый высокочувствительный метод анализа агрегации тромбоцитов // Лаб. дело. 1989. № 10. С.15–18.
231. Сергеев П.В., Духанин А.С., Губаева Ф.Р. Ранние этапы механизма действия глюкокортикоидов на тромбоциты человека. Влияние гидрокортизона на агрегацию тромбоцитов // Бюллетень эксперимент. биологии и медицины. 1997. Т.123, №1. С.54–57.
232. Мазуров А.В., Идельсон Г.Л., Хачикян М.В., Домогатский С.П. Взаимодействие тромбоцитов с ¹²⁵I-меченым коллагеном III типа. Необходимость образования фибриллярных структур // Биохимия. 1989. Т.54, №8. С.1280–1289.

233. *Furchgott R.F., Jothianandan D.* Endothelium-dependent and independent vasodilatation involving cyclic GMP: relaxation induced by nitric oxide, carbon monoxide and light // *Blood Vessels*. 1991. Vol.28. P. 52–61.
234. *Ignarro L.J., Wood K.S.* Activation of purified soluble guanylate cyclase by arachidonic acid requires absence of enzyme-bound heme // *Biochem. Biophys. Acta*. 1987. Vol.928. P.160–170.
235. *Волин М.С., Дэвидсон К.А., Каминска П.М. и др.* Механизмы передачи сигнала оксидант-оксид азота в сосудистой ткани // *Биохимия*. 1998. №63(7). С.958–965.
236. *Реутов В.П.* Биохимическое предопределение NO-синтазной и нитритредуктазной компонент цикла оксида азота // *Биохимия*. 1999. №64(5). С.634–651.
237. *Реутов В.П., Сорокина Е.Г.* NO-синтазная и нитритредуктазная компоненты цикла оксида азота // *Биохимия*. 1998. №63(7). С.1029–1040.
238. *Ignarro L.J., Buga G.M., Wood K.S. et al.* Endothelium-derived relaxing factor produced and released from artery and vein is nitric oxide // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1987. Vol.84. P.9265–9269.
239. *Kirichuk V.F., Volin M.V.* The specialties of inhibiting effect of electromagnetic irradiation of millimetre diapason on platelet aggregation by patients with unstable angina pectoris // *Haemostasis*. 2000. (suppl.1). P.83.
240. *Северина И.С.* Растворимая гуанилатциклаза в молекулярном механизме физиологических эффектов окиси азота // *Биохимия*. 1998. Т.63, №7. С.939–997.
241. *Киричук В.Ф., Креницкий А.П., Майбородин А.В. и др.* Исследование КВЧ-индуцированного межклеточного взаимодействия в системе форменных элементов крови // *Биомед. технологии и радиоэлектроника*. 2005. № 1–2. С. 3–8.
242. *Киричук В.Ф., Головачева Т.В., Чиж А.Г.* КВЧ-терапия. Саратов, 1999. 360 с.
243. *Киричук В.Ф., Креницкий А.П., Майбородин А.В. и др.* КВЧ-индуцированное взаимодействие в системе форменных элементов крови // *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. 2004. №1(33). С.34–39.
244. *Руев В.В., Василенко В.В., Кобаидзе В.В.* Опыт применения миллиметровой терапии для лечения пациентов с рассеянным склерозом // *Миллиметровые волны в биологии и медицине: Сб. докл. 12-й Рос. симпоз. с междунар. участием М., 2000.* С. 69–71.
245. *Новиков В.Д., Цыцорина Т.Н., Куницин В.Б. и др.* Планетарная и эритроцитарная мембрана в условиях физиологической и патологической беременности: Тез. докл. 10-й Всесоюз. съезда анатомов, гистологов и эмбриологов. Винница, 1986. С.47.
246. *Пешков М.А.* Цитология бактерий. М.; Л., 1955. С.14–56.
247. *Гамалей И.А., Клубин И.В.* Перикись водорода как сигнальная молекула // *Цитология*. 1996. Т.38, №12. С.1233–1247.
248. *Рассудов С.М.* Влияние возраста культуры на биологические свойства брюшнотифозных бактерий: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Саратов, 1954. 16 с.
249. *Belyaev I.Y., Shcheglov V.S., Alipov E.D.* // *IEEE Trans. on Microwave Theory ad Techniques*. 2000. Vol.48, №11. P. 38–45.
250. *Кикнадзе Г.С., Есаков Б.П., Кузьминых С.Б., Комаров В.М.* Опыт оценки степени загрязнения водной среды по изменениям периода биения сердца дафнии / Науч. центр биол. исслед. АН СССР. Пущино, 1983. 13с.
251. *Усанов Д.А., Креницкий А.П., Майбородин А.В. и др.* Воздействие излучения терагерцового диапазона частот на функциональное состояние дафнии // *Биомед. технологии и радиоэлектроника*. 2005. № 8. С. 54–58.
252. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В.* Эффект синхронизации внешним электрическим полем частоты сердцебиений дафнии // *Письма в ЖТФ*. 1999. Т.25, вып.4. С.74–78.
253. *Бецкий О.В., Усанов Д.А., Майбородин А.В. и др.* Изменение функционального состояния дафнии при воздействии потока атмосферного воздуха, возбужденного

- электромагнитным терагерцовым излучением // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2006. № 5–6. С. 50–55.
254. *Усанов Д.А., Креницкий А.П., Майбородин А.В. и др.* Воздействие излучения терагерцового диапазона частот на функциональное состояние дафнии // Физика и технические приложения волновых процессов: Тез. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. / Под ред. В.А. Неганова и Г.П. Ярового. 3–9 окт. 2005 г. Н. Новгород, 2005. С.278.
255. *Усанов Д.А., Шишкин Г.Г., Скрипаль А.В., Усанов А.Д.* Влияние внешнего переменного магнитного поля на частоту сердцебиений пресноводного рачка – дафнии // Биомед. технологии и радиоэлектроника. 2001. №8. С.57–61.
256. *Усанов Д.А., Шишкин Г.Г., Скрипаль А.В., Усанов А.Д.* Воздействие переменных магнитных полей низкой интенсивности на частоту сердцебиений дафнии // Биомед. технологии и радиоэлектроника. 2003. №3. С.59–62.
257. *Усанов Д.А., Майбородин А.В., Креницкий А.П. и др.* Воздействие переменного магнитного поля и электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот на функциональное состояние дафнии // Миллиметровые волны в медицине и биологии. 2006. № 4. С.32–34.
258. *Креницкий А.П., Майбородин А.В., Бецкий О.В.* Метод и устройство ингаляционной терагерцовой акустической НО-терапии // Биомед. технологии и радиоэлектроника. 2006. №1–2. С.46–49.
259. *Усанов Д.А., Креницкий А.П., Майбородин А.В. и др.* Воздействие переменного магнитного поля, электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот и потока атмосферного воздуха на функциональное состояние дафнии // XI Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM'2008. СПб., 2008. Ч.2. С. 120–121
260. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Курганов А.В.* Определение параметров магнитной жидкости по отражению сверхвысокочастотного излучения // ЖТФ. 2001. Т.71, №12. С.26–29.
261. *Усанов Д.А., Сучков С.Г., Усанов А.Д.* // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2006. №1–2. С. 67–69.
262. *Кузнецов А.Н.* Биофизика электромагнитных воздействий. М., 1994. 255 с.
263. *Колупаев Б.И.* Метод биотестирования по изменению дыхания и сердечной деятельности у дафний // Методы биотестирования вод / Отв. ред. А.И. Крайнюкова. 1988. 103 с.
264. *Усанов Д.А., Горбатов С.С., Вениг С.Б., Орлов В.Е.* Резонансы в полупроводниковом волноводе с диафрагмой, связанные с возбуждением волн высших типов // Письма в ЖТФ. 2000. Т.26, вып. 18. С. 47–49.
265. *Усанов Д.А., Горбатов С.С.* Волноводный измерительный резонатор // Изв. вузов Сер. Радиоэлектроника. 2002. Т.45, №9. С. 26–28.
266. *Усанов Д.А., Шишкин Г.Г., Горбатов С.С., Усанов А.Д.* Определение влияния переменного магнитного поля на физические характеристики воды СВЧ-методом // Биомед. технологии и радиоэлектроника. 2006. Вып. 5–6. С. 65–69.
267. *Usanov D.A., Krenitskiy A.P., Maiborodin A.V. et al.* Terahertz waves and perspectives of terahertz biomedical technologies development. // MIKON-2008 — XVII Intern. Conf. on Mirowaves, Radar and Wireless Communications. Poland, Wroclaw, May 19–21. 2008. Vol.3. P. 735–744.
268. Стимулирующее влияние переменного магнитного поля на митотическую активность и рост кукурузы / В.С. Тырнов, Ю.А. Смирнова, А.Д. Усанов и др. // Вавиловские чтения – 2004: Материалы Всерос. конф. 24–26 нояб. 2004 г. Секция генетики и селекции. Саратов, 2004. С. 65–67.
269. *Холодов Ю. А.* Магнетизм в биологии. М., 1970. 96 с.

270. *Холодов Ю. А.* Шестой незримый океан (очерки по электромагнитной биологии). М., 1978. 112 с.
271. *Леднев В.В.* Биоэффекты слабых комбинированных постоянных и переменных магнитных полей // *Биофизика*. 1996. Т. 41, вып. 1. С. 815–825.
272. *Кострюкова Н.К., Гудков А.Б., Карпин В.А.* Биологические эффекты сверхслабых магнитных полей. Обзор литературы // *Экология человека*. 2004. Вып. 3. С. 55–59.
273. Влияние естественных и слабых искусственных магнитных полей на биологические объекты: Материалы Второго Всесоюз. симпозиума / Под ред. М.П. Травкина. Белгород, 1973. Т. 22. 173 с.
274. Живые системы в электромагнитных полях: Сб. науч. тр./ Под ред. Г.Ф. Плеханова. Томск, 1979. Вып. 2. 180 с.
275. *Мочалкин Л. И., Рик Г. Р., Батыгин Н. Ф.* К вопросу о влиянии магнитного поля на биологические объекты: Тр. по агр. физике. М., 1962. Вып. 10. С. 48–50.
276. Биологические механизмы и феномены действия низко-частотных и статистических электромагнитных полей на живые системы // Материалы Всесоюз. симпозиума / Под ред. Г.Ф. Плеханова. Томск, 1984. 158 с.
277. *Усанов Д.А., Шишкин Г.Г., Скрипаль А.В. и др.* Дафния как биоиндикатор электромагнитных воздействий на водную среду // *Петерб. журн. электроники*. 2002. № 4. С. 38–42.

Учебное издание

*Усанов Дмитрий Александрович,
Скрипаль Анатолий Владимирович,
Усанов Андрей Дмитриевич,
Рытик Андрей Петрович*

**БИОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Учебное пособие для студентов факультета
нано- и биомедицинских технологий, обучающихся по специальности
«Медицинская физика» и направлению «Биомедицинская инженерия»

Редактор Е.А. Митенёва
Технический редактор Л.В. Агальцова
Корректор Е.Б. Крылова
Оригинал-макет подготовил А.П. Рытик

Подписано в печать 27.08.2008.

Формат 60 × 80 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ.л 7,90 (8,5). Уч.-изд.л. 7,7. Тираж 100. Заказ 92.

Издательство Саратовского университета.
410012, Саратов, Астраханская, 83.
Типография Издательства Саратовского университета.
410012, Саратов, Астраханская, 83.