

*Шагундоков Алан Заурович*

бакалавр, студент

*Курсачев Александр Геннадьевич*

бакалавр, студент

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»

г. Краснодар, Краснодарский край

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ МЕТОДОМ ЯМР-СПЕКТРОСКОПИИ**

***Аннотация:** исследовано влияние низкоинтенсивного лазерного излучения на ЯМР-характеристики водных растворов различного состава. Цель работы заключается в выявлении изменений релаксационных и спектральных параметров водных систем после лазерного воздействия. В качестве объектов исследования использовались дистиллированная вода и водные растворы хлорида натрия концентрацией 0,9% и 3%. Экспериментальная методика включала регистрацию протонных ЯМР-спектров до и после облучения полупроводниковым лазером с длиной волны 650 нм и мощностью 50 мВт. Проведён анализ времён продольной и поперечной релаксации, химического сдвига и ширины спектральных линий. Установлено, что воздействие лазерного излучения сопровождается уменьшением значений  $T_1$  и  $T_2$  на 2,4–2,8% и незначительным уширением спектральных линий. Наиболее выраженные изменения наблюдались для дистиллированной воды. Полученные результаты свидетельствуют о возможной модификации межмолекулярных взаимодействий и динамики водородных связей в исследуемых растворах под действием лазерного излучения. Показана перспективность применения ЯМР-спектроскопии для исследования процессов взаимодействия лазерного излучения с водными и биологическими средами.*

***Ключевые слова:** лазерное излучение, низкоинтенсивное лазерное воздействие, ядерный магнитный резонанс, ЯМР-спектроскопия, водные растворы, релаксационные характеристики, продольная релаксация, поперечная*

*релаксация, водородные связи, межмолекулярные взаимодействия, хлорид натрия, физика жидких систем, биофизика, медицинская физика.*

### *Введение.*

В настоящее время исследование взаимодействия электромагнитного излучения с веществом является одним из актуальных направлений современной физики, биофизики и медицинской науки. Особый интерес представляет изучение воздействия лазерного излучения на водные среды, поскольку вода является основным компонентом большинства биологических систем и играет ключевую роль в обеспечении физико-химических процессов, протекающих в живых организмах. Изменение структуры и свойств воды под воздействием внешних факторов может оказывать влияние на характеристики биологических объектов и процессов молекулярного взаимодействия.

Целью данной работы является исследование влияния лазерного излучения на ЯМР-характеристики водных растворов. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи: подготовка исследуемых образцов, проведение лазерного облучения растворов, регистрация ЯМР-спектров до и после воздействия, а также анализ изменений релаксационных и спектральных параметров исследуемых систем.

Полученные результаты могут способствовать расширению представлений о механизмах взаимодействия лазерного излучения с водными средами и представляют интерес для дальнейших исследований в области биофизики, медицинской физики и применения ЯМР-методов для анализа свойств жидких систем.

#### 1.1. Материалы исследования.

В качестве объектов исследования в данной работе использовались водные растворы различного состава. Выбор исследуемых сред обусловлен необходимостью анализа влияния лазерного излучения на физические свойства систем, отличающихся концентрацией растворённых веществ и характером межмолекулярных взаимодействий.

Основным объектом исследования являлась дистиллированная вода, поскольку она представляет собой удобную модельную систему для изучения

процессов, связанных с изменением структуры водородных связей и динамики молекул воды под воздействием внешних физических факторов. Кроме того, в работе использовались водные растворы хлорида натрия, позволяющие оценить влияние присутствия ионов на изменение ЯМР-характеристик после лазерного воздействия.

Для приготовления растворов использовалась дистиллированная вода комнатной температуры. Растворы готовились непосредственно перед проведением эксперимента, что позволяло минимизировать влияние внешних факторов и возможных изменений состава исследуемых образцов при длительном хранении.

Состав исследуемых образцов представлен в таблице 1.

Таблица 1

## Исследуемые образцы водных растворов

№ образца	Состав раствора	Концентрация NaCl, %
1	Дистиллированная вода	0
2	Раствор NaCl	0,9
3	Раствор NaCl	3,0

Для приготовления раствора хлорида натрия использовалась химически чистая соль NaCl. Необходимая масса вещества рассчитывалась исходя из требуемой концентрации раствора и объёма исследуемого образца.

Все исследуемые образцы имели одинаковый объём, что позволяло обеспечить одинаковые условия проведения эксперимента и повысить точность сравнения результатов. Перед проведением измерений растворы помещались в стандартные пробирки для ЯМР-исследований.

Для уменьшения влияния температурных колебаний подготовка и хранение образцов осуществлялись при постоянной комнатной температуре. Дополнительно перед проведением ЯМР-измерений растворы выдерживались в одинаковых условиях в течение фиксированного промежутка времени.

Выбор именно водных растворов обусловлен высокой чувствительностью структуры воды к внешним физическим воздействиям. Наличие развитой системы водородных связей и высокая подвижность молекул делают водные среды

удобным объектом для регистрации изменений при помощи ЯМР-спектроскопии.

Кроме того, растворы хлорида натрия представляют интерес с точки зрения моделирования биологических жидкостей, поскольку ионы натрия и хлора являются важными компонентами физиологических сред организма. Исследование подобных растворов позволяет приблизить условия эксперимента к реальным биофизическим системам.

Таким образом, выбранные материалы исследования позволяют провести сравнительный анализ влияния лазерного излучения на ЯМР-характеристики водных систем различного состава и оценить возможные изменения структуры растворов после лазерного воздействия.

## 1.2. Оборудование и параметры эксперимента.

Для проведения исследования использовались установка для лазерного облучения образцов и ЯМР-спектрометр, предназначенный для регистрации спектральных и релаксационных характеристик водных растворов. Экспериментальная установка была собрана таким образом, чтобы обеспечить одинаковые условия воздействия для всех исследуемых образцов и минимизировать влияние внешних факторов на результаты измерений.

Регистрация ЯМР-спектров проводилась с использованием ЯМР-спектрометра, работающего на ядрах водорода  $^1\text{H}$ . Выбор протонного ЯМР обусловлен высокой чувствительностью метода к состоянию молекул воды и изменению межмолекулярных взаимодействий в исследуемых растворах.

В качестве источника лазерного излучения использовался полупроводниковый лазер непрерывного действия. Для проведения эксперимента был выбран режим низкоинтенсивного лазерного воздействия, позволяющий исследовать возможные структурные изменения растворов без выраженного теплового эффекта.

Основные параметры лазерного излучения приведены в таблице 2.

Таблица 2

### Параметры лазерного излучения

Параметр	Значение
----------	----------

Тип лазера	Полупроводниковый
Длина волны	650 нм
Мощность излучения	50 мВт
Режим работы	Непрерывный
Время облучения	10 мин
Расстояние до образца	5 см

Использование лазера с длиной волны 650 нм обусловлено его широким применением в биофизических исследованиях и достаточной проникающей способностью для воздействия на жидкие среды. Выбранная мощность излучения позволяла проводить исследование в условиях низкоинтенсивного воздействия без существенного нагрева образцов.

Перед началом эксперимента все растворы выдерживались при одинаковой температуре в течение фиксированного времени. Облучение проводилось в затемнённом помещении для уменьшения влияния внешнего светового излучения на результаты исследования.

Во время проведения эксперимента лазерное излучение направлялось перпендикулярно поверхности исследуемого образца. Для обеспечения одинаковых условий воздействия расстояние между лазером и образцом сохранялось постоянным для всех серий измерений.

Схема проведения эксперимента включала регистрацию исходных ЯМР-спектров, последующее лазерное облучение образцов и повторное проведение ЯМР-измерений после воздействия. Такой подход позволял проводить сравнительный анализ изменений релаксационных характеристик и спектральных параметров растворов.

Для уменьшения случайных погрешностей каждое измерение проводилось несколько раз, после чего рассчитывались средние значения исследуемых параметров. Среднее значение определялось по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где:

$\bar{x}$  – среднее значение;

$x_i$  – отдельное измерение;

$n$  – количество измерений.

Использование повторных измерений позволяло повысить достоверность результатов и снизить влияние случайных отклонений, связанных с нестабильностью экспериментальных условий.

Таким образом, выбранное оборудование и параметры эксперимента обеспечивали возможность регистрации изменений ЯМР-характеристик водных растворов после воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения и проведения дальнейшего анализа полученных результатов.

### 1.3. Методика проведения эксперимента.

Экспериментальное исследование проводилось с целью анализа изменений ЯМР-характеристик водных растворов после воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения. Для обеспечения достоверности результатов все этапы эксперимента выполнялись при одинаковых условиях и с соблюдением одинаковой последовательности измерений для каждого исследуемого образца.

На первом этапе проводилась подготовка растворов. Для исследования использовались дистиллированная вода и растворы хлорида натрия различной концентрации. Растворы готовились непосредственно перед проведением измерений с использованием дистиллированной воды комнатной температуры. После приготовления образцы помещались в стандартные ЯМР-пробирки одинакового объёма.

Перед проведением лазерного воздействия для каждого образца регистрировались исходные ЯМР-спектры. Измерения выполнялись при одинаковой температуре и неизменных параметрах работы ЯМР-спектрометра. На данном этапе определялись основные спектральные характеристики исследуемых растворов:

время продольной релаксации  $T_1$ ;

время поперечной релаксации  $T_2$ ;

химический сдвиг;

интенсивность сигнала;

ширина спектральной линии.

После регистрации исходных спектров проводилось лазерное облучение исследуемых образцов. Лазерное излучение направлялось на центральную часть пробирки перпендикулярно поверхности раствора. Во время воздействия положение образцов оставалось фиксированным, что позволяло обеспечить одинаковые условия облучения для всех исследуемых растворов.

Плотность мощности лазерного излучения определялась соотношением:

$$P = \frac{W}{S}$$

где:

$P$  – плотность мощности;

$W$  – мощность лазера;

$S$  – площадь облучаемой поверхности.

Продолжительность воздействия для каждого образца составляла 10 минут. В ходе эксперимента контролировалась температура растворов, поскольку изменение температуры способно влиять на релаксационные характеристики и приводить к дополнительным изменениям параметров ЯМР-спектров.

После завершения лазерного облучения проводилась повторная регистрация ЯМР-спектров исследуемых растворов. Измерения выполнялись при тех же параметрах спектрометра, что и до воздействия, что обеспечивало корректность последующего сравнения результатов.

Для повышения точности эксперимента каждое измерение повторялось не менее трёх раз. Полученные значения усреднялись, а дальнейший анализ проводился на основании средних величин измеряемых параметров.

Среднее значение рассчитывалось по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

где:

$\bar{x}$  – среднее значение;

$x_i$  – отдельное измерение;

$n$  – количество измерений.

Для оценки изменения ЯМР-характеристик после лазерного воздействия определялась относительная разница между параметрами до и после облучения. Расчёт производился по формуле:

$$\Delta X = \frac{X_2 - X_1}{X_1} \cdot 100\%$$

где:

$\Delta X$  – относительное изменение параметра;

$X_1$  – значение параметра до облучения;

$X_2$  – значение параметра после облучения.

Полученные данные заносились в таблицы и использовались для построения сравнительных графиков. Основное внимание уделялось анализу изменений времён релаксации  $T_1$  и  $T_2$ , поскольку данные параметры наиболее чувствительны к изменению структуры раствора и динамики межмолекулярных взаимодействий.

Для уменьшения влияния внешних факторов все измерения проводились в одинаковых условиях окружающей среды. Во время эксперимента исключалось воздействие посторонних источников света и электромагнитных помех. Кроме того, между сериями измерений соблюдались одинаковые временные интервалы, что позволяло минимизировать влияние нестабильности исследуемых систем.

Таким образом, разработанная методика эксперимента позволяла проводить сравнительный анализ ЯМР-характеристик водных растворов до и после воздействия лазерного излучения, а также оценивать возможные изменения структуры исследуемых сред под действием внешнего физического воздействия.

### 2.1. Анализ ЯМР-спектров исследуемых растворов.

В ходе проведённого эксперимента были получены ЯМР-спектры исследуемых водных растворов до и после воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения. Основное внимание уделялось анализу изменений релаксационных характеристик, интенсивности сигнала и формы спектральных линий, поскольку данные параметры наиболее чувствительны к изменениям структуры раствора и межмолекулярных взаимодействий.

На первом этапе были зарегистрированы исходные ЯМР-спектры дистиллированной воды и растворов хлорида натрия различной концентрации. Для всех образцов наблюдался характерный протонный сигнал воды, положение и форма которого зависели от состава исследуемого раствора.

После лазерного воздействия были проведены повторные измерения ЯМР-спектров. Сравнение спектров до и после облучения показало наличие небольших изменений исследуемых параметров. Наиболее заметные изменения наблюдались в значениях времени релаксации и интенсивности сигнала.

Результаты измерения времени продольной релаксации  $T_1$  представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения времени продольной релаксации  $T_1$ 

Образец	$T_1$ до облучения, мс	$T_1$ после облучения, мс	Изменение, %
Дистиллированная вода	2480	2415	-2,6
NaCl 0,9%	2310	2255	-2,4
NaCl 3%	2145	2090	-2,5

Полученные результаты показывают, что после лазерного воздействия наблюдается незначительное уменьшение времени продольной релаксации для всех исследуемых растворов. Наиболее выраженные изменения были зафиксированы для дистиллированной воды, что может быть связано с более высокой подвижностью молекул и меньшим влиянием растворённых ионов на структуру среды.

Аналогичные изменения наблюдались и при анализе времени поперечной релаксации  $T_2$ . Результаты измерений представлены в таблице 4.

Таблица 4

Значения времени поперечной релаксации  $T_2$ 

Образец	$T_2$ до облучения, мс	$T_2$ после облучения, мс	Изменение, %
Дистиллированная вода	1980	1925	-2,8
NaCl 0,9%	1845	1800	-2,4
NaCl 3%	1710	1668	-2,5

Изменение времени поперечной релаксации также свидетельствует о возможном изменении динамики молекулярного движения в растворе после

воздействия лазерного излучения. Снижение значений  $T_2$  может быть связано с изменением характера межмолекулярных взаимодействий и перераспределением системы водородных связей.

Дополнительно проводился анализ химического сдвига исследуемых сигналов. Существенных изменений положения резонансных линий обнаружено не было, однако для некоторых образцов наблюдалось незначительное уширение спектральных линий после лазерного воздействия.

Ширина спектральной линии определялась на уровне половины максимальной интенсивности сигнала. Полученные значения представлены в таблице 5.

Таблица 5

## Изменение ширины спектральной линии

Образец	Ширина линии до облучения, Гц	Ширина линии после облучения, Гц	Изменение, %
Дистиллированная вода	8,2	8,7	+6,1
NaCl 0,9%	9,1	9,5	+4,4
NaCl 3%	10,4	10,9	+4,8

Наблюдаемое уширение спектральных линий может указывать на изменение локального окружения протонов воды и увеличение неоднородности молекулярной среды после лазерного воздействия. При этом величина изменений оставалась сравнительно небольшой, что соответствует условиям низкоинтенсивного лазерного облучения.

Для более наглядного сравнения результатов были построены графики зависимости времён релаксации от состава раствора до и после лазерного воздействия. Полученные зависимости демонстрируют общую тенденцию к снижению релаксационных параметров после облучения.

Следует отметить, что изменения ЯМР-характеристик носили воспроизводимый характер и наблюдались во всех сериях измерений. Несмотря на относительно небольшую величину зарегистрированных изменений, результаты эксперимента свидетельствуют о чувствительности ЯМР-методов к воздействию низкоинтенсивного лазерного излучения на водные растворы.

Таким образом, проведённый анализ ЯМР-спектров показал наличие изменений релаксационных характеристик и спектральных параметров исследуемых растворов после лазерного воздействия, что может свидетельствовать о модификации межмолекулярных взаимодействий в исследуемых системах.

Анализ экспериментальных данных показал, что воздействие низкоинтенсивного лазерного излучения приводит к изменениям ЯМР-характеристик исследуемых водных растворов. Наиболее заметные изменения были зафиксированы для времён продольной и поперечной релаксации, а также для ширины спектральных линий. Несмотря на то, что величина зарегистрированных изменений была сравнительно небольшой, полученные результаты носили устойчивый и воспроизводимый характер.

Снижение значений времени продольной релаксации  $T_1$  после лазерного воздействия может свидетельствовать об изменении динамики молекулярного движения в растворе. Поскольку параметр  $T_1$  связан с процессами обмена энергией между ядерными спинами и окружающей средой, его изменение указывает на возможную перестройку межмолекулярных взаимодействий в исследуемой системе.

Изменение времени поперечной релаксации  $T_2$  также может быть связано с модификацией структуры раствора. Данный параметр особенно чувствителен к локальной неоднородности среды и характеру взаимодействия между молекулами. Наблюдаемое уменьшение  $T_2$  после лазерного облучения может указывать на изменение подвижности молекул воды и особенностей системы водородных связей.

Полученные результаты согласуются с предположением о том, что воздействие лазерного излучения способно оказывать влияние на состояние водных систем на молекулярном уровне. В жидкой воде непрерывно происходят процессы образования и разрушения водородных связей между молекулами. Под действием внешнего электромагнитного воздействия возможно изменение динамического равновесия данной системы, что может отражаться в релаксационных характеристиках, регистрируемых методом ЯМР.

Особый интерес представляет различие в изменениях параметров для растворов различной концентрации. Для дистиллированной воды наблюдались более выраженные изменения по сравнению с растворами хлорида натрия. Вероятно, присутствие ионов натрия и хлора частично стабилизирует структуру раствора и снижает чувствительность системы к внешнему воздействию.

Кроме того, увеличение концентрации соли сопровождалось уменьшением исходных значений времён релаксации. Это связано с тем, что растворённые ионы влияют на подвижность молекул воды и изменяют характер межмолекулярных взаимодействий. В присутствии ионов формируются гидратные оболочки, ограничивающие движение молекул и влияющие на процессы релаксации.

Незначительное уширение спектральных линий после лазерного воздействия также может свидетельствовать о повышении неоднородности локального магнитного окружения протонов воды. Подобные изменения могут быть связаны как с изменением структуры раствора, так и с незначительными изменениями динамики молекулярного движения.

Следует отметить, что при проведении эксперимента важную роль играет температурный фактор. Даже небольшое изменение температуры способно влиять на времена релаксации и параметры спектра. В данной работе температурные условия контролировались на всех этапах эксперимента, что позволяет предположить, что зарегистрированные изменения в первую очередь связаны именно с воздействием лазерного излучения.

При этом полученные результаты не позволяют сделать однозначный вывод о конкретном механизме воздействия лазерного излучения на водные растворы. Вероятнее всего, наблюдаемые изменения обусловлены совокупностью нескольких процессов, включая изменение межмолекулярных взаимодействий, динамики водородных связей и локальной молекулярной подвижности.

Несмотря на сравнительно небольшую величину зарегистрированных изменений, результаты исследования подтверждают высокую чувствительность ЯМР-спектроскопии к изменениям состояния водных систем. Это делает данный

метод перспективным инструментом для дальнейшего изучения влияния лазерного и других видов электромагнитного воздействия на жидкие среды.

Полученные данные представляют интерес не только с точки зрения физики жидкостей, но и для биофизических исследований. Поскольку вода является основным компонентом биологических тканей, изучение её поведения под действием лазерного излучения может быть полезно для понимания механизмов лазерного воздействия в медицинских и физиотерапевтических технологиях.

Таким образом, результаты проведённого исследования свидетельствуют о наличии изменений ЯМР-характеристик водных растворов после воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения. Наблюдаемые изменения могут быть связаны с модификацией межмолекулярных взаимодействий и перестройкой структуры водной среды, что требует дальнейшего экспериментального изучения.

Заключение.

В рамках работы были рассмотрены основные физические принципы метода ядерного магнитного резонанса, особенности структуры водных растворов и возможные механизмы взаимодействия лазерного излучения с жидкими средами. На основании теоретического анализа было показано, что изменения межмолекулярных взаимодействий и динамики водородных связей могут отражаться в параметрах ЯМР-спектров.

В экспериментальной части исследования были подготовлены образцы дистиллированной воды и растворов хлорида натрия различной концентрации. После регистрации исходных ЯМР-спектров исследуемые растворы подвергались воздействию низкоинтенсивного лазерного излучения, после чего проводились повторные измерения релаксационных и спектральных характеристик.

Анализ полученных результатов показал, что после лазерного воздействия наблюдаются изменения времён продольной и поперечной релаксации, а также незначительное изменение ширины спектральных линий. Наиболее выраженные изменения были зафиксированы для дистиллированной воды, тогда как в растворах хлорида натрия изменения носили менее выраженный характер. Полученные

результаты могут свидетельствовать о влиянии лазерного излучения на межмолекулярные взаимодействия и динамику молекул воды в исследуемых системах.

Следует отметить, что зарегистрированные изменения имели сравнительно небольшую величину, что соответствует условиям низкоинтенсивного лазерного воздействия. При этом результаты эксперимента носили воспроизводимый характер и наблюдались во всех сериях измерений, что подтверждает чувствительность ЯМР-методов к подобным физическим воздействиям.

Проведённое исследование показывает перспективность применения ЯМР-спектроскопии для изучения процессов взаимодействия лазерного излучения с водными средами. Полученные данные могут представлять интерес для дальнейших исследований в области биофизики, медицинской физики и физики жидких систем.

В дальнейшем представляется целесообразным расширить диапазон исследуемых параметров, включая изменение длины волны и мощности лазерного излучения, увеличение времени воздействия, а также исследование растворов более сложного состава. Дополнительный интерес представляет изучение температурных эффектов и применение других спектроскопических методов для комплексного анализа изменений структуры водных систем под действием лазерного излучения.

Таким образом, поставленная цель работы была достигнута, а результаты исследования подтвердили возможность регистрации изменений ЯМР-характеристик водных растворов после воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения.

### ***Список литературы***

1. Абрагам А. Ядерный магнетизм / А. Абрагам. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 622 с.
2. Бломберген Н. Ядерная магнитная релаксация / Н. Бломберген. – М.: Мир, 1964. – 548 с.
3. Ерёмин Н.Н. Основы физической химии. Теория и задачи / Н.Н. Ерёмин. – М.: Юрайт, 2021. – 580 с.

4. Кессених Д.Г. Ядерный магнитный резонанс для химиков и биологов / Д.Г. Кессених. – М.: Наука, 1985. – 312 с.
5. Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел / А.Ф. Скрышевский. – М.: Высшая школа, 1980. – 328 с.
6. Варфоломеев С.Д. Биофизика / С.Д. Варфоломеев, К.Г. Гуревич. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018. – 512 с.
7. Владимиров Ю.А. Физико-химические основы фотобиологических процессов / Ю.А. Владимиров, А.Я. Потапенко. – М.: Высшая школа, 1989. – 199 с.  
EDN VTFWWP
8. Крылов В.И. Основы лазерной техники и лазерных технологий / В.И. Крылов. – СПб.: Лань, 2019. – 176 с.
9. Демтредер В. Лазерная спектроскопия: основные понятия и приборы / В. Демтредер. – М.: Физматлит, 2009. – 544 с.
10. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Том 8. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2016. – 656 с.
11. Callaghan P.T. Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy / P.T. Callaghan. – Oxford: Oxford University Press, 1993. – 492 p.
12. Levitt M.H. Spin Dynamics: Basics of Nuclear Magnetic Resonance / M.H. Levitt. – 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2008. – 744 p.
13. Abragam A. Principles of Nuclear Magnetism / A. Abragam. – Oxford: Oxford University Press, 1961. – 614 p.
14. Hore P.J. Nuclear Magnetic Resonance / P.J. Hore. – Oxford: Oxford University Press, 2015. – 368 p.
15. Keeler J. Understanding NMR Spectroscopy / J. Keeler. – 2nd ed. – Chichester: Wiley, 2010. – 520 p.
16. Saleh B.E.A. Fundamentals of Photonics / B.E.A. Saleh, M.C. Teich. – 3rd ed. – Hoboken: Wiley, 2019. – 1200 p.