

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

«Утверждаю»

Декан факультета ВМК МГУ  
имени М.В. Ломоносова

академик



\_\_\_\_\_ Е.И. Моисеев

« \_\_\_\_\_ » 2017 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**«Избранные главы квантовой информатики»**

Уровень высшего образования – подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре

Направление подготовки – 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника»

Направленность (профиль) – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»

2017

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **1. НАИМЕНОВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Избранные главы квантовой информатики

### **2. УРОВЕНЬ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре.

### **3. НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ, НАПРАВЛЕННОСТЬ (ПРОФИЛЬ) ПОДГОТОВКИ**

Направление подготовки – 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника». Направленность (профиль) – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»

### **4. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ**

Дисциплина входит в вариативную часть образовательной программы.

### **5 АННОТАЦИЯ (+ желательно еще и английский вариант)**

Дисциплина «Избранные главы квантовой информатики» содержит основные сведения по квантовой теории в изложении, предназначенном для аспирантов с базовой математической и программистской подготовкой: пространство квантовых состояний, операторы физических величин, уравнение Шредингера, унитарные эволюции и измерения, матрица плотности, запутанность, формализм Дирака, векторизация матричных уравнений, квантовая гидродинамика Бома-де Бройля, а также вычислительные методы: метод Хартри-Фока, диффузионный метод Монте-Карло, и начала квантовой томографии. Даются начальные сведения из теории квантовых компьютеров: методы реализации квантовых гейтов, и квантовых вычислений: алгоритм Гровера, а также методы численного моделирования многочастичных квантовых систем.

The discipline "Selected topics of quantum informatics" will provide some basic information on quantum theory in the form arranged for postgraduates with the basic mathematical and programming education: the space of quantum states, operators of physical quantities, Schrödinger equation, unitary evolution and measurement, density matrix, entanglement, the formalism of Dirac, vectorization of matrix equations, quantum hydrodynamics of de

Brohile-Boom, and also computational methods, Hartree-Fock, diffusion Monte-Carlo method, and initial notions of quantum tomography. The basic data is given on the theory of quantum computers: methods of implementing quantum gates, and quantum computations: Grover's algorithm, as well as methods for the numerical simulation of many-particle quantum systems.

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

Дисциплина участвует в формировании следующих компетенций образовательной программы:

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения
Владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности (ОПК-1)	<p><b>ЗНАТЬ:</b> классические математические методы, применяющиеся для решения задач в области естественных наук, экономики, социологии и информационно-коммуникационных технологий;</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> применять классические методы построения и анализа математических моделей;</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> базовыми навыками выбора методов и средств построения анализа математических моделей.</p>
Владение современными алгоритмами разработки программного обеспечения вычислительных комплексов (ПК-3)	<p><b>ЗНАТЬ:</b> современные алгоритмы разработки программного обеспечения вычислительных комплексов;</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> применять современные алгоритмы разработки программного обеспечения вычислительных комплексов;</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> базовыми навыками выбора современных алгоритмов разработки программного обеспечения вычислительных комплексов.</p>
Владение современными методами построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, также методами разработки и реализации алгоритмов их решения на основе фундаментальных знаний в области математики и информатики (ПК-1)	<p><b>ЗНАТЬ:</b> классические методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также базовые методы разработки и реализации алгоритмов их решения;</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> применять классические методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также базовые методы разработки и реализации алгоритмов их решения;</p>

	ВЛАДЕТЬ: базовыми навыками выбора методов построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также методов разработки и реализации алгоритмов их решения.
--	---

Оценочные средства для промежуточной аттестации приведены в Приложении.

## 6. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Объем дисциплины составляет 4 зачетные единицы, всего 108 часа.

72 часа составляет контактная работа с преподавателем – 32 часов занятий лекционного типа, 26 часов занятий семинарского типа (семинары, научно-практические занятия, лабораторные работы и т.п.), 12 часов индивидуальных консультаций, 4 часа групповых консультаций, 8 часов мероприятий текущего контроля успеваемости, 4 часа промежуточной аттестации.

72 часа составляет самостоятельная работа учащегося.

## 7. ВХОДНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Учащиеся должны владеть знаниями по программированию, математическому анализу, линейной алгебре, дифференциальным уравнениям и краевым задачам, численным методам в объеме, соответствующем основным образовательным программам бакалавриата по укрупненным группам направлений и специальностей 01.00.00 «Математика и механика», 02.00.00 «Компьютерные и информационные науки».

## 8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В процессе обучения используются пакеты прикладных программ МATHEMATICA, язык программирования Python, пакет прикладных программ Lараск, методы распараллеливания OpenMP и MPI.

## 9. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной	Всего (часы)	В том числе	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них	Самостоятельная работа учащегося, часы из них

аттестации по дисциплине		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости: коллоквиумы, практические контрольные занятия и др.	<b>Всего</b>	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п..	<b>Всего</b>
<p><b>Тема 1. Основные понятия квантовой механики</b></p> <p>Классическое и квантовое пространство состояний, эрмитовы и унитарные операторы, измерения и унитарная эволюция. Уравнение Шредингера и решение задачи Коши для него. Представление физических величин операторами. Операторы координаты, импульса, энергии, их собственные значения и собственные функции. Дельта-функции. Формализм Дирака. Понятие дискретизации, сопряженное пространство. Понятие измерения.</p>	<b>36</b>	12	10	-	-	2	<b>24</b>	12	-	<b>12</b>

<p>Вычисление энергии основного состояния на компьютере. Метод Хартри-Фока. Диффузионный метод Монте-Карло.</p> <p>Тензорное произведение пространств, состояний и операторов. Запутанные состояния и запутывающие операторы. Частичные измерения и относительная матрица плотности.</p> <p>Чистые и смешанные состояния. Квантовая томография. Уравнение Шредингера для матрицы плотности. Разложение Шмидта и степень двухчастичной запутанности.</p> <p>Неравенство Белла. Квантовая нелокальность. Протокол телепортации.</p>										
<b>Тема 2. Принцип интерференции.</b>	<b>16</b>	4	4	-	-	2	<b>10</b>	-	-	<b>6</b>

<p>Принцип интерференции как основа матричной механики. Понятие интеграла по путям Фейнмана. Эквивалентность интегрирования по путям и уравнения Шредингера. Случай свободной частицы и гармонического осциллятора.</p> <p>Соотношение неопределенности Бора-Гейзенберга для координаты и импульса. Аналитическая и алгебраическая формулировки принципа неопределенности.</p> <p>Оптическая иллюстрация принципа интерференции. Переход от классического описания системы к квантовому в терминах компьютерного моделирования квантовой динамики.</p>										
<p><b>Тема 3. Элементы теории момента количества движения.</b></p> <p>Момент импульса и его</p>	<b>16</b>	4	4	-	-	2	<b>10</b>	6	-	<b>6</b>

<p>собственные значения и функции. Правила коммутации операторов. Коммутативные соотношения для компонентов момента.</p> <p>Обобщенный оператор момента и его отличие от момента импульса. Эксперимент Штерна-Герлаха и его интерпретация. Понятие спина электрона. Уравнение Шредингера для электрона со спином. Матрицы Паули. Спинорные волновые функции.</p> <p>Бозоны и фермионы в терминах спина. Принцип запрета Паули.</p> <p>Спин композитной системы на примере 2 электронов. Различные базисы. Коэффициенты Клебша-Гордана.</p>										
<b>Тема 4. Элементы квантовых вычислений.</b>	<b>34</b>	10	10	-	-	2	<b>12</b>	2	-	<b>12</b>



<p>Классические вычисления с оракулом и их сложность. Обратимый оракул. Понятие квантового алгоритма и квантового вычисления. Квантовый оракул. Квантовый параллелизм. Квантовое ускорение. Алгоритм Гровера для переборной задачи, его разновидности и оптимальность. Понятие нижних оценок квантовой сложности.</p> <p>Квантовые гейты и их массивы. Квантовое преобразование Фурье и его сложность. Схема Абрамса-Ллойда и ее применение для факторизации целых чисел. Понятие алгоритма Шора (без подробного доказательства).</p> <p>Квантовое моделирование реальных микросистем. Алгоритм Залки-Визнера.</p> <p>Физическое конструирование квантовых гейтов на примере зарядовых</p>													
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

кубитов. Гейт CNOT Валиева-Федичкина. Требования к качеству квантовых гейтов. Квантовая коррекция ошибок. Код Шора. Декогерентность и методы ее преодоления.										
<b>Промежуточная аттестация – практическое контрольное задание + индивидуальное собеседование</b>	<b>42</b>	-	-	2	-	4	<b>6</b>	16	-	<b>36</b>
<b>Итого</b>	<b>108</b>						<b>72</b>	<b>72</b>		

## 10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ УЧАЩИХСЯ

Самостоятельная работа учащихся состоит в изучении лекционного материала, учебно-методической литературы, подготовки к практическим заданиям текущего контроля и промежуточной аттестации.

## 11. РЕСУРСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Основная учебно-методическая литература

- 1) Р.Фейнман, Д.Лейтон, П.Сэндз, «Квантовая механика», М.Наука, 2006.
- 2) Дж. Прескилл, «Квантовые вычисления и квантовые коммуникации» (1,2,3 тома), М.:Бином, 2009. Электронный вариант: Jh. Preskill, Quantum computations and communications, Lecture Notes in Computer Science, 2001.
- 3) Д.А.Кронберг, Ю.И.Ожигов, А.Ю.Чернявский, «Квантовая информатика и квантовый компьютер», изд.-во Макс-Пресс, МГУ, М. 2011.

Дополнительная учебно-методическая литература

- 1) Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, «Квантовая механика. Нерелятивистская теория», М.Наука, Физ-мат. Лит. 1971.
- 2) Д.А.Кронберг, Ю.И.Ожигов, А.Ю.Чернявский, «Алгебраический аппарат квантовой информатики», изд.-во Макс-Пресс, МГУ, М. 2011.

- 3) Ю.И.Ожигов, «Квантовые вычисления», изд.-во Макс-Пресс, МГУ, 2003.
- 4) К.Коэн-Таннуджи, Б.Диу, Ф.Лалозэ, «Квантовая механика.» тома 1,3. М., URSS, 2016. - 412 стр.

Ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

- 1) <http://www.arxiv.org>, [quant-ph](http://www.quant-ph)
- 2) <http://sci.cs.msu.ru/>
- 3) <http://sqi.cs.msu.su/learning/materials>

Информационные технологии, используемые в процессе обучения

В процессе обучения используются пакеты прикладных программ МАТНЕМАТІСА, Lараск.

Материально-техническая база

Для преподавания дисциплины желательно иметь на ноутбуках слушателей установленный пакет МАТНЕМАТІСА, или интерпретатор Python, а также подключение к Интернет.

## **12. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ**

Русский

## **13. РАЗРАБОТЧИК ПРОГРАММЫ, ПРЕПОДАВАТЕЛИ**

д.ф.- м.н., профессор Ожигов Юрий Игоревич ([ozhigov@cs.msu.su](mailto:ozhigov@cs.msu.su))



**Оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине**

Промежуточная аттестация состоит из двух этапов – выполнения практического контрольного задания, проверяющего приобретенные учащимся умения и навыки, и индивидуального собеседования, проверяющего приобретенные знания.

Средства для оценивания планируемых результатов обучения, критерии и показатели оценивания приведены ниже.

РЕЗУЛЬТАТ ОБУЧЕНИЯ	КРИТЕРИИ и ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ОБУЧЕНИЯ из соответствующих карт компетенций					ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА
	1	2	3	4	5	
	Неудовлетворительно	Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично	
ЗНАТЬ: современные математические методы, применяющиеся для решения задач в области естественных наук, экономики, социологии и информационно-коммуникационных технологий <b>Код 31 (ОПК-1)</b>	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о современных математических методах, применяющихся для решения задач в области естественных наук, экономики, социологии и информационно-коммуникационных технологий	В целом сформированные, но неполные знания о современных математических методах, применяющихся для решения задач в области естественных наук, экономики, социологии и информационно-коммуникационных технологий	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания о современных математических методах, применяющихся для решения задач в области естественных наук, экономики, социологии и информационно-коммуникационных технологий	Сформированные систематические знания о современных математических методах, применяющихся для решения задач в области естественных наук, экономики, социологии и информационно-коммуникационных технологий	Устный экзамен
УМЕТЬ: применять современные ме-	Отсутствие умений	Фрагментарные умения применять современные методы постановки и	В целом успешное, но не систематическое умение применять со-	Успешное, но содержащее отдельные пробелы умение при-	Сформированное умение применять современные методы	отчет

тоды постановки и анализа задач в области математики и информатики <b>Код У1 (ОПК-1)</b>		анализа задач в области математики и информатики	временные методы постановки и анализа задач в области математики и информатики	менять современные методы постановки и анализа задач в области математики и информатики	постановки и анализа задач в области математики и информатики	
<b>ВЛАДЕТЬ:</b> навыками оптимального выбора современных методов и средств постановки и анализа задач в области математики и информатики <b>Код В1 (ОПК-1)</b>	Отсутствие навыков	Фрагментарное владение навыками оптимального выбора современных методов и средств постановки и анализа задач в области математики и информатики	В целом успешное, но не полное владение навыками оптимального выбора современных методов и средств постановки и анализа задач в области математики и информатики	Успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками оптимального выбора современных методов и средств постановки и анализа задач в области математики и информатики	Сформированное владение навыками оптимального выбора современных методов и средств постановки и анализа задач в области математики и информатики	отчет
<b>ЗНАТЬ:</b> современные алгоритмы разработки программного обеспечения вычислительных комплексов; <b>Код З1 (ПК-3)</b>	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о современных алгоритмах разработки программного обеспечения вычислительных комплексов	В целом сформированные, но неполные знания о современных алгоритмах компьютерной математики, о математической теории, лежащей в их основе	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания о современных алгоритмах компьютерной математики, о математической теории, лежащей в их основе	Сформированные систематические знания о современных алгоритмах компьютерной математики, о математической теории, лежащей в их основе	Устный экзамен
<b>УМЕТЬ:</b> применять современные алгоритмы разработки программного обеспечения вычислительных	Отсутствие умений	Фрагментарные умения применять современные алгоритмы разработки программного обеспечения вычислительных комплексов	В целом успешное, но не систематическое умение применять современные алгоритмы разработки программного обеспечения вычислительных	Успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять современные алгоритмы разработки программного обеспечения	Сформированное умение применять современные алгоритмы разработки программного обеспечения вычислительных ком-	отчет

х комплексов <b>Код У1 (ПК-3)</b>			комплексов	вычислительных комплексов	плексов	
ВЛАДЕТЬ: базовыми навыками выбора современных алгоритмов разработки программного обеспечения вычислительных комплексов <b>Код В1 (ПК-3)</b>	Отсутствие навыков	Фрагментарное владение базовыми навыками выбора современных алгоритмов разработки программного обеспечения вычислительных комплексов	В целом успешное, но не полное владение базовыми навыками выбора современных алгоритмов разработки программного обеспечения вычислительных комплексов	Успешное, но содержащее отдельные пробелы владение базовыми навыками выбора современных алгоритмов разработки программного обеспечения вычислительных комплексов	Сформированное владение базовыми навыками выбора современных алгоритмов разработки программного обеспечения вычислительных комплексов	отчет
ЗНАТЬ: современные методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения <b>Код З1 (ПК-1)</b>	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о современных методах построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных методах разработки и реализации алгоритмов их решения	В целом сформированные, но неполные знания о современных методах построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных методах разработки и реализации алгоритмов их решения	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания о современных методах построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных методах разработки и реализации алгоритмов их решения	Сформированные систематические знания о современных методах построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных методах разработки и реализации алгоритмов их решения	Устный экзамен
УМЕТЬ: применять современные ме-	Отсутствие умений	Фрагментарные умения применять современные методы построения и	В целом успешное, но не систематическое умение применять со-	Успешное, но содержащее отдельные пробелы умение при-	Сформированное умение применять современные методы	отчет

<p>тоды построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения</p> <p><b>Код У1 (ПК-1)</b></p>		<p>анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>временные методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>менять современные методы построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современные методы разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	
<p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> навыками оптимального выбора современных методов построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных методов разработки и реализации алго-</p>	<p>Отсутствие навыков</p>	<p>Фрагментарное владение навыками оптимального выбора современных методов построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных методов разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>В целом успешное, но не полное владение навыками оптимального выбора современных методов построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных методов разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>Успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками оптимального выбора современных методов построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных методов разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>Сформированное владение навыками оптимального выбора современных методов построения и анализа математических моделей, возникающих при решении естественнонаучных задач, а также современных методов разработки и реализации алгоритмов их решения</p>	<p>отчет</p>



ритмов их решения Код В1 (ПК-1)						
------------------------------------	--	--	--	--	--	--

