

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Институт физики

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной деятельности

Нургалиев Д.К.

« 23 » сентября 20 14 г.



Программа дисциплины
Астрометрия и небесная механика Б1.В.ОД.7

- Направление подготовки: 03.06.01 – Физика и астрономия
- Профиль подготовки: 01.03.01 – Астрометрия и небесная механика
- Квалификация выпускника: «Исследователь. Преподаватель-исследователь»

Казань 2014

1. КРАТКАЯ АННОТАЦИЯ

Цель - формирование представлений о различных методах установления и реализации различных систем координат и счета времени, методов экспериментального определения положения различных объектов в выбранных системах отсчета, описания и определения движения этих объектов и различных методах обработки наблюдательной информации о геометрии, кинематике и динамике этого движения. Курс «Астрометрия и небесная механика» представляет собой одну из важнейших составляющих обучения по программе аспирантуры одноименного профиля. Предназначение дисциплины заключено в овладении современным комплексом концепций, знаний, представлений и гипотез о геометрии и кинематике объектов видимой Вселенной.

Содержание курса посвящено изучению как фундаментальных классических основ астрометрии и небесной механики, так и наиболее значимых достижений последних десятилетий в этих областях профессиональных знаний. Весьма важно, что значительная часть вопросов, рассматриваемых в рамках изучаемого курса, опирается на результаты успешно реализованных космических программ, инициирующих дальнейшее развитие новейших разделов астрономии и геодезии.

Программа дисциплины «Астрометрия и небесная механика» включает изучение основ и методов реализации небесных и земных координатных систем, классических астрометрических методик определения положения и собственного движения объектов на небесной сфере, методов космической и радиоастрометрии, обеспечивающих современного исследователя всей необходимой ему высокоточной координатно-временной и навигационной геопространственной информацией. В результате освоения небесномеханических разделов дисциплины аспирант получает знания о методах математического описания и определения движения небесных тел естественного и рукотворного происхождения, а также представления об алгоритмах и навыках обработки разнородной наблюдательной информации в интересах астрономии, геодезии, астро- и геодинамики. По этому курсу сдается кандидатский экзамен.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ) В СТРУКТУРЕ ОПОП

Данная учебная дисциплина включена в раздел «Б1.В.ОД Обязательные дисциплины» основной профессиональной образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре. Осваивается на 3 году обучения, 5 семестр.

Изучение данной дисциплины базируется на вузовской подготовке аспирантов по таким базовым предметам как астрономия, геодезическая астрономия, небесная механика, астрометрия и ряда дисциплин по выбору.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

Обучающийся, завершивший изучение дисциплины, должен

знать:

- основы установления и реализации земных и небесных систем координат с использованием наземных и космических методов, и их взаимосвязь друг с другом;
- алгоритмы решения основных задач небесной механики, методы определения орбит небесных тел, методы численного интегрирования и построения аналитических теорий;

уметь:

- решать уравнения ограниченной задачи трех тел;
- осуществлять преобразования различных систем координат;

владеть:

- пониманием методик наземных астрометрических наблюдений и их обработки;
 - пониманием методик определения эфемерид и орбит небесных тел и ИСЗ;
- демонстрировать способность и готовность:

- использовать приобретенные знания в исследованиях по астрометрии, небесной механике, звездной динамике и астродинамике.

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
УК-1	способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях
УК-3	готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач
УК-5	способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития
ОПК-1	способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий
ПК-1	способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области астрометрии, небесной механики, астродинамики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта
ПК-2	способность принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научных исследованиях в области определения орбит небесных тел, методов численного интегрирования и методов построения аналитических теорий
ПК-3	способность планировать и организовывать физические исследования, научные семинары и конференции

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

4.1. Распределение трудоёмкости дисциплины (в часах) по видам нагрузки обучающегося и по разделам дисциплины

Общая трудоёмкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы - 108 часов.

Форма промежуточной аттестации по дисциплине: экзамен в 5 семестре.

№	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Лекции	Практи- ческие занятия	Лабораторные работы	Самосто- ятельная работа
1.	Тема 1. Системы координат и времени. Система астрономо-геодезических постоянных	5	4	0	0	6
2.	Тема 2. Наземная оптическая астрометрия. Космическая астрометрия. Радиоастрометрия.	5	4	0	0	6
3.	Тема 3. Вращение Земли и ее ориентация в пространстве. Изучение вращения Земли наземными и космическими методами наблюдений	5	4	0	0	8
4.	Тема 4. Аналитические методы небесной механики.	5	4	0	0	
5.	Тема 5. Качественные методы небесной механики.	5	4	0	0	
6.	Тема 6. Движение спутников планет и искусственных спутников Земли.	5	4	0	0	
7	Тема 7. Определение орбит по результатам измерений.	5	4	0	0	10
8	Тема 8. Основы гравиметрии. изучение формы земли и ее потенциала наземными и космическими методами наблюдений	5	4	0	0	6
9	Тема 9. Звездная динамика.	5	4	0	0	
	Подготовка к кандидатскому экзамену	5	0	0	0	36
	Итого		36	0	0	72

4.2 Содержание дисциплины

Тема 1. Системы координат и времени.

лекционное занятие (4 часа): Системы астрономо-геодезических постоянных 1896, 1964, 1976/80 гг. Системы геодезических параметров Земли. Теоретические связи между постоянными. Понятие системы координат и реализации системы координат в форме координатной основы. Небесные и земные системы координат и их реализация. Измерение времени: шкала атомного времени IAT. Классические шкалы времени UTO, UT1, UT2, ET. Релятивистские шкалы времени TDT и TDB, TT, TCG, TCB. Хранение и воспроизведение шкал времени и эталонных частот. Методы их распространения и синхронизации. Небесная опорная система координат (ICRF) и земная опорная система координат (ITRF). Радиолокационные и радиоинтерферометрические методы наблюдений тел Солнечной системы. Методы согласования оптических и радиосистем координат.

Тема 2. Наземная оптическая астрометрия. Космическая астрометрия.

лекционное занятие (4 часа): Меридианная астрометрия. Теория и устройство основных меридианных инструментов. Методы абсолютных и относительных определений координат. Звездные каталоги и их систематические ошибки. Вывод фундаментальной системы звездных положений и собственных движений. Ориентировка системы координат. Относительные и сводные каталоги. Важнейшие фундаментальные каталоги. Фотографическая астрометрия. Астрографы и приборы для измерения астронегативов. Измеренные и стандартные координаты. Методы Тернера и Шлезингера. Фотографические определения координат Луны, планет и ИСЗ. Определение собственных движений и параллаксов звезд. Использование галактик для вывода ошибок системы собственных движений звезд. Фотографические каталоги. Карта неба, каталоги Астрономического общества (AGK), каталог PPM. Использование ПЗС в астрометрии и космической геодезии. Техника лазерной локации ИСЗ и Луны. Методы позиционных измерений небесных объектов с помощью космических аппаратов. Проект Hipparcos. Интерферометрические методы в астрометрии. Наземные и космические интерферометры. Спутниковые навигационные системы. Орбитальные и наземные технические средства позиционирования потребителя.

Тема 3. Вращение Земли и ее ориентация в пространстве

лекционное занятие (4 часа): Явления прецессии, нутации, абберации и рефракции. Изменения координат звезд под влиянием рефракции, параллакса, абберации, нутации, прецессии и собственных движений звезд; редуцированные вычисления; эфемеридная проблема в астрономии; методы определения основных астрометрических постоянных. Приведение на видимое место. Радиоинтерферометры со сверхдлинной базой (РСДБ), устройство, принцип измерений. Корреляционная обработка сигналов в РСДБ. Радиоастрономические методы определения координат объектов, неравномерности вращения Земли, движения полюсов и расстояний на поверхности Земли. Уравнения Эйлера, Пуассона, Лиувилля. Неравномерность вращения Земли вокруг оси. Движение полюсов. Инструменты для изучения вращения Земли: пассажный инструмент, зенит-телескоп, призменная астролябия, фотографическая зенитная труба, РСДБ, лазерный дальномер, глобальные навигационные спутниковые системы. Интерпретация движения полюсов и неравномерности вращения Земли. Короткопериодические, сезонные, вековые вариации вращения Земли. Чандлеровское движение полюса. Международная Служба Вращения Земли (IERS), ее организации и задачи. Стандарты MCB3 (IERS). Изучение прецессии и нутации оси вращения Земли методами РСДБ.

Тема 4. Аналитические методы небесной механики.

лекционное занятие (4 часа): Возмущенное движение. Уравнения движения тел и их первые интегралы. Уравнения движения в координатах Якоби. Уравнения движения Эйлера и Лагранжа в оскулирующих элементах. Теория возмущенного движения. Малые параметры в теории движения планет и спутников. Промежуточные орбиты. Разложение пертурбационной функции. Интегрирование с помощью рядов по степеням времени (метод неопределенных коэффициентов и метод рядов Ли). Формальное интегрирование уравнений движения в

элементах промежуточной орбиты методом малого параметра Ляпунова - Пуанкаре. Малые знаменатели. Резонанс.

Тема 5. Качественные методы небесной механики.

лекционное занятие (4 часа): Теоремы Пуанкаре о ранге и классе возмущений. Сходимость в методе малого параметра. Формальное интегрирование методом осреднения. Асимптотический характер метода осреднения. Канонические преобразования. Метод Гамильтона-Якоби. Метод преобразований Ли в теории возмущений. Теория вековых возмущений. Уравнения поступательно-вращательного движения небесных тел. Стационарные решения этих уравнений. Переменные действие - угол. Интегрируемые системы. Теорема Лиувилля. Теоремы Брунса и Пуанкаре об интегрируемости задачи нескольких тел. Сохранение фазового объема. Периодические орбиты. Методы Ляпунова и Пуанкаре. Функция последования. Условно-периодические функции. Среднее значение. Инвариантные торы. Основные идеи метода Колмогорова - Арнольда - Мозера. Основы первого и второго методов Ляпунова определения устойчивости движения. Орбитальная устойчивость. Устойчивость по Лагранжу. Устойчивость по Пуассону. Ограниченная задача трех тел. Интеграл Якоби. Топология поверхностей Хилла. Устойчивость точек либрации. Семейства периодических решений вблизи точек либрации.

Тема 6. Движение спутников планет и искусственных спутников Земли.

лекционное занятие (4 часа): Возмущенное движение спутников. Промежуточная орбита. Возмущающие факторы в движении естественных спутников планет. Возмущающие факторы в движении искусственных спутников Земли. Разложение возмущающей функции, обусловленной нецентральностью гравитационного поля планеты. Возмущения от зональных гармоник. Возмущения от тессеральных и секториальных гармоник. Возмущающая функция от притяжения внешнего тела. Лунно-солнечные возмущения ИСЗ. Интегрирование уравнений обобщенной задачи двух неподвижных центров. Характер движения. Формулы промежуточной орбиты. Возмущения на основе промежуточной орбиты обобщенной задачи двух неподвижных центров. Задача Хилла и ее использование в теории движения. Возмущения, вызываемые сопротивлением атмосферы планеты. Возмущения от светового давления и приливов в теле упругой планеты.

Тема 7. Определение орбит по результатам измерений.

лекционное занятие (4 часа): Постановка задачи определения орбит. Определение орбиты по двум положениям. Основы методов Лапласа и Гаусса определения орбиты по трем угловым наблюдениям. Метод дифференциального уточнения параметров движения небесных тел из наблюдений. Метод наименьших квадратов при известной ковариационной матрице наблюдений. Метод наименьших модулей. Построение условных уравнений при уточнении элементов орбит спутников из лазерных и радиотехнических наблюдений. Уравнивание спутниковых наблюдений.

Тема 8. Основы гравиметрии. изучение формы земли и ее потенциала наземными и космическими методами наблюдений

лекционное занятие (4 часа): Основы теории гравитационного потенциала. Представление потенциала в виде разложения по сферическим функциям. Сходимость разложения. Гравитационный потенциал Земли, Луны, планет. Масконы. Основы теории фигуры Земли. Методы определения параметров гравитационного поля и фигуры небесных тел.

Тема 9. Звездная динамика.

лекционное занятие (4 часа): Структура Галактики. Подсистемы Галактики. Кинематика Галактики. Характеристики вращения и распределений остаточных скоростей. Модели Галактики и орбиты звезд в них. Динамика бесстолкновительных звездных систем. Уравнение Больцмана. Интегралы движения. Теория движения в поле ротационно-симметричного потенциала. Поле направлений движения. Фигуры равновесия небесных тел.

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Лекции (использование проблемных ситуаций), практические занятия, на которых аспиранты выступают с презентациями по теме данного практического занятия (у каждого аспиранта индивидуальная тема для презентации), самостоятельная работа аспиранта (подготовка презентаций для практических занятий, подготовка к устному опросу), консультации.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

Вопросы к занятиям

Тема 1. Системы координат и времени.

Средства хранения, воспроизведения шкал времени и эталонных частот

Тема 2. Наземная оптическая астрометрия. Космическая астрометрия.

Методы абсолютных и относительных определений координат.

Звездные каталоги и их систематические ошибки.

Ориентировка системы координат.

Относительные и сводные каталоги.

Важнейшие фундаментальные каталоги

Тема 3. Вращение Земли и ее ориентация в пространстве

Инструменты для изучения вращения Земли: пассажный инструмент, зенит-телескоп, призмная астролябия, фотографическая зенитная труба, РСДБ, лазерный дальномер, глобальные навигационные спутниковые системы.

Интерпретация движения полюсов и неравномерности вращения Земли: короткопериодические, сезонные, вековые вариации вращения Земли. Чандлеровское движение полюса.

Тема 4. Аналитические методы небесной механики.

Уравнения движения тел и их первые интегралы.

Малые параметры в теории движения планет и спутников.

Разложение пертурбационной функции.

Малые знаменатели. Резонанс.

Тема 5. Качественные методы небесной механики.

Орбитальная устойчивость.

Устойчивость по Лагранжу.

Устойчивость по Пуассону.

Ограниченная задача трех тел.

Семейства периодических решений вблизи точек либрации.

Тема 6. Движение спутников планет и искусственных спутников Земли.

Возмущающие факторы в движении естественных спутников планет.

Возмущающие факторы в движении искусственных спутников Земли.

Тема 8. Основы гравиметрии. изучение формы земли и ее потенциала наземными и космическими методами наблюдений

Гравитационный потенциал Земли, Луны, планет. Масконы.

Методы определения параметров гравитационного поля и фигуры небесных тел.

Тема 9. Звездная динамика.

Структура Галактики.

Подсистемы Галактики.

Модели Галактики и орбиты звезд в них.

7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

7.1. Регламент дисциплины

Самостоятельная работа нацелена на повышение эффективности и практической направленности обучения, умения ставить задачи и находить способы ее решения. Выполнение заданий содержит элементы исследования и способствует выработке навыков в принятии обоснованных решений. Контроль степени усвоения учебного материала проводится методом проверки выполнения индивидуальных заданий. Задание может быть оформлено либо письменно на бумажном носителе, либо в электронно-цифровой форме. Все отмеченные рецензентом ошибки должны быть исправлены, а сделанные указания выполнены. Выполненные работы в обязательном порядке обсуждаются с преподавателем.

Суммарно по дисциплине можно получить максимум 100 баллов, из них текущий контроль в течение семестра оценивается в 50 баллов, зачёт - в 50 баллов.

Баллы за работу в течение семестра распределяются следующим образом:

10 баллов – устные ответы на практических занятиях: ответы с докладами, ответы на вопросы, участие в дискуссии, анализ текстов и т. п. Начисляется до 2 баллов за 1 занятие.

5 баллов – **Тема 1.** Написание реферата.

5 баллов – **Тема 2.** Предоставление обзорного доклада с презентацией

10 баллов – **Тема 3.** Письменное домашнее задание - расчетная задача

10 баллов – **Тема 7.** Расчетная задача: определение орбиты спутника

10 баллов – **Тема 8.** Предоставление обзорного доклада с презентацией

Итого: 50 баллов.

7.2. Оценочные средства текущего контроля

Тема 1.

Темы рефератов:

Деятельность международного астрономического союза (МАС): история и современность, роль в развитии фундаментальной науки; (УК-3, 5)

Радиолокационные и радиointерферометрические методы наблюдений тел Солнечной системы (УК-1, ОПК-1, ПК-1).

Тема дискуссии: Влияние современных достижений астрометрии на развитие смежных разделов науки - астрофизики и геофизики.

Контрольные вопросы:

1. Влияние современных достижений астрометрии на развитие смежных разделов науки - астрофизики и геофизики.
2. Теория меридианного круга и абсолютные методы определения координат звезд. Современные меридианные инструменты.
3. Построение инерциальной системы координат - фундаментальная проблема астрометрии.
4. Системы фундаментальных астрономических постоянных. Значение и классификация астрономических постоянных
5. Метод радиointерферометрии со сверхдлинной базой – основа для построения инерциальной системы координат.
6. Оптические интерферометры и метод спекл-интерферометрии.

Тема 2.

Обзорный доклад с презентацией: Изучение вращения Земли наземными и космическими методами наблюдений (УК-3, ОПК-1, ПК-1, 2)

Контрольные вопросы:

1. Сравнение астрономического и атомного времени
2. Обнаружение и исследование неравномерностей вращения Земли вокруг своей оси.
3. Международная и национальные службы точного времени.
4. Передача точного времени в системе глобального спутникового позиционирования (GPS)

Тема 3.

Письменное домашнее задание - расчетная задача: Приведение наблюдения на видимое место (на основе данных АЕ) (УК-3,5, ПК-1)

Контрольные вопросы:

1. Понятие прецессии и нутации
2. Учет влияния прецессии и нутации

Тема 7.

Расчетная задача: определение орбиты спутника одним из выбранных методов (УК-5, ПК-1,2)

Контрольные вопросы:

1. Ограниченная задача 3-х тел. Области движения.
2. Ограниченная задача 3-х тел. Точки либрации, вычисление их координат.
3. Ограниченная задача 3-х тел. Движение в окрестности точек либрации.
4. Канонические уравнения эллиптического движения, уравнения Лагранжа.

Тема 8.

Обзорный доклад с презентацией: Методы определения параметров гравитационного поля и фигуры небесных тел (ОПК-1, ПК-1,3).

Контрольные вопросы:

1. Наблюдения с современными панорамными приемниками изображений (ПЗС-матрицы) - основа повышения точности массовых наземных определений координат звезд.
2. Краткая характеристика теории движения больших планет, астероидов, Луны, спутников планет и комет.
3. Устойчивость и эволюция Солнечной системы.

7.3. Примерные вопросы к экзамену

(полный список вопросов к кандидатскому экзамену по дисциплине приведен в Приложении 1, каждый аспирант также должен утвердить на Ученом совете Института Физики дополнительную программу со списком вопросов по теме своего диссертационного исследования (образец дополнительной программы в Приложении 2))

1. Явления прецессии, нутации, абберации и рефракции. Приведение на видимое место.
2. Методы определения основных астрометрических постоянных. Теоретические связи между постоянными. Системы астрономических постоянных 1896, 1964, 1976/80 гг.
3. Геометрический, кинематический и динамический методы построения системы отсчета.
4. Измерение времени: шкала атомного времени IAT. Классические шкалы времени UTO, UT1, UT2, ET. Релятивистские шкалы времени TDT и TDB, TT, TCG, TCB.
5. Хранение и воспроизведение шкал времени и эталонных частот. Методы их распространения и синхронизации.
6. Меридианная астрометрия. Теория и устройство основных меридианных инструментов. Методы абсолютных и относительных определений координат.
7. Звездные каталоги и их систематические ошибки. Вывод фундаментальной системы звездных положений и собственных движений. Ориентировка системы координат. Относительные и сводные каталоги. Важнейшие фундаментальные каталоги.
8. Фотографическая астрометрия. Астрографы и приборы для измерения астронегативов. Измеренные и стандартные координаты. Методы Тернера и Шлезингера. Фотографические определения координат Луны, планет и ИСЗ.
9. Определение собственных движений и параллаксов звезд. Использование галактик для вывода ошибок системы собственных движений звезд.
10. Фотографические каталоги. Карта неба, каталоги Астрономического общества (AGK), каталог PPM.
11. Использование ПЗС в астрометрии.
12. Техника лазерной локации ИСЗ и Луны.
13. Методы позиционных измерений небесных объектов с помощью космических аппаратов. Проект Hipparcos.

14. Интерферометрические методы в астрометрии. Наземные и космические интерферометры.
15. Спутниковые навигационные системы. Орбитальные и наземные технические средства.
16. Радиointерферометры со сверхдлинной базой (РСДБ), устройство, принцип измерений. Корреляционная обработка сигналов в РСДБ.
17. Радиоастрономические методы определения координат объектов, неравномерности вращения Земли, движения полюсов и расстояний на поверхности Земли.
18. Небесная опорная система координат (ICRS) и земная опорная система координат (ITRF).
19. Радиолокационные и радиointерферометрические методы наблюдений тел Солнечной системы.
20. Методы согласования оптических и радиосистем координат.
21. Уравнения Эйлера, Пуассона, Лиувилля.
22. Неравномерность вращения Земли вокруг оси. Движение полюсов.
23. Инструменты для изучения вращения Земли: пассажный инструмент, зенит-телескоп, призменная астролябия, фотографическая зенитная труба, РСДБ, лазерный дальномер, системы GPS и Глонасс.
24. Интерпретация движения полюсов и неравномерности вращения Земли. Короткопериодические, сезонные, вековые вариации вращения Земли. Чандлеровское движение полюса.
25. Международная Служба Вращения Земли (IERS), ее организации и задачи. Стандарты MCB3 (IERS).
26. Изучение прецессии и нутации оси вращения Земли методами РСДБ.
27. Невозмущенное движение. Уравнения движения в задаче двух тел и их решение. Возмущенное движение. Уравнения движения n тел и их первые интегралы. Уравнения движения в координатах Якоби.
28. Уравнения движения Эйлера и Лагранжа в оскулирующих элементах. Теория возмущенного движения. Малые параметры в теории движения планет и спутников. Промежуточные орбиты. Разложение пертурбационной функции.
29. Интегрирование с помощью рядов по степеням времени (метод неопределенных коэффициентов и метод рядов Ли).
30. Формальное интегрирование уравнений движения в элементах промежуточной орбиты методом малого параметра Ляпунова-Пуанкаре. Малые знаменатели. Резонанс.
31. Теоремы Пуанкаре о ранге и классе возмущений. Сходимость в методе малого параметра.
32. Формальное интегрирование методом осреднения. Асимптотический характер метода осреднения.
33. Канонические преобразования. Метод Гамильтона-Якоби.
34. Метод преобразований Ли в теории возмущений. Теория вековых возмущений.
35. Уравнения поступательно-вращательного движения небесных тел. - Стационарные решения этих уравнений.
36. Переменные действие - угол. Интегрируемые системы. Теорема Лиувилля Теоремы Брунса и Пуанкаре об интегрируемости задачи нескольких тел.
37. Сохранение фазового объема. Периодические орбиты. Методы Ляпунова и Пуанкаре. Функция последования.
38. Условно-периодические функции. Среднее значение. Инвариантные торы. Основные идеи метода Колмогорова - Арнольда - Мозера.
39. Основы первого и второго методов Ляпунова определения устойчивости движения. Орбитальная устойчивость. Устойчивость по Лагранжу. Устойчивость по Пуассону.
40. Ограниченная задача трех тел. Интеграл Якоби. Топология поверхностей Хилла. Устойчивость точек либрации. Семейства периодических решений вблизи точек либрации.

41. Основы теории гравитационного потенциала. Представление потенциала в виде разложения по сферическим функциям. Сходимость разложения. Гравитационный потенциал Земли, Луны, планет. Масконы.
42. Основы теории фигуры Земли. Методы определения параметров гравитационного поля и фигуры.
43. Возмущенное движение спутников. Промежуточная орбита. Возмущающие факторы в движении естественных спутников планет. Возмущающие факторы в движении искусственных спутников Земли.
44. Разложение возмущающей функции, обусловленной не центральностью гравитационного поля планеты. Возмущения от зональных гармоник. Возмущения от тессеральных и секториальных гармоник. Возмущающая функция от притяжения внешнего тела. Лунно-солнечные возмущения ИСЗ.
45. Интегрирование уравнений обобщенной задачи двух неподвижных центров. Характер движения. Формулы промежуточной орбиты. Возмущения на основе промежуточной орбиты обобщенной задачи двух неподвижных центров.
46. Задача Хилла и ее использование в теории движения.
47. Возмущения, вызываемые сопротивлением атмосферы планеты. Возмущения от светового давления и приливов в теле упругой планеты.
48. Постановка задачи определения орбит. Определение орбиты по двум положениям. Основы методов Лапласа и Гаусса определения орбиты по трем угловым наблюдениям.
49. Метод дифференциального уточнения параметров движения небесных тел из наблюдений. Метод наименьших квадратов при известной ковариационной матрице наблюдений. Метод коллокации. Метод наименьших модулей.
50. Построение условных уравнений при уточнении элементов орбит спутников из лазерных и радиотехнических наблюдений.
51. Структура Галактики. Подсистемы Галактики.
52. Кинематика Галактики. Характеристики вращения и распределений остаточных скоростей.
53. Модели Галактики и орбиты звезд в них.
54. Динамика бесстолкновительных звездных систем. Уравнение Больцмана. Интегралы движения.
55. Теория движения в поле ротационно-симметричного потенциала. Поле направлений движения.
56. Фигуры равновесия небесных тел.

7.4. Таблица соответствия компетенций, критериев оценки их освоения и оценочных средств

Индекс компетенции	Расшифровка компетенции	Показатель формирования компетенции для данной дисциплины	Оценочное средство
УК-1	способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	знать небесные и земные системы координат и их реализацию в астрономии, геодезии, астродинамике, ГНСС технологиях. Уметь анализировать уровень актуальности проблемы и современности материалов докладов	Тема 1. Реферат

УК-3	готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач	организовать научный семинар, принимать этически корректные управленческие решения, вести дискуссии, обсуждение материала	Тема 1. Реферат Тема 2. Обзорный доклад с презентацией Тема 3. Письменное домашнее задание
УК-5	способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития	Уметь однозначно и кратко формулировать задачи, вопросы, выбирать алгоритмы решения	Тема 3. Письменное домашнее задание Тема 7. Расчетная задача
ОПК-1	способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий	Умение самостоятельно собрать нужный материал с использованием различных источников, обобщить, проанализировать полученную информацию и представить результаты исследования в виде публичного сообщения	Тема 2. Обзорный доклад с презентацией
ПК-1	способностью самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области астрометрии, небесной механики, астродинамики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта	Уметь составлять условные уравнения при уточнении элементов орбит спутников из лазерных и радиотехнических наблюдений, уравнивать спутниковые наблюдения	Тема 7. Расчетная задача Тема 8. Обзорный доклад с презентацией
ПК-2	способность принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научных исследованиях в области определения орбит небесных тел, методов численного интегрирования и методов построения аналитических теорий	Умение на основе анализа рассмотренных методов и методических подходов выбрать оптимальный способ решения поставленной задачи	Тема 2. Обзорный доклад с презентацией Тема 7. Расчетная задача
ПК-3	способность планировать и организовывать физические исследования, научные семинары и конференции	Умение подготовить научный доклад и представить его для соответствующей аудитории слушателей	Тема 8. Обзорный доклад с презентацией

8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПРИ ОСВОЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

После прослушивания курса лекций аспирант должен приступить к самостоятельному изучению дисциплины. Самостоятельное изучение дисциплины необходимо проводить в порядке предусмотренном настоящей программой и использованием других методических материалов по дисциплине. Рекомендуется при изучении теоретической части курса выполнить краткий конспект, а при выполнении практических и самостоятельных заданий составлять алгоритмы, схемы, сводки формул решения задач.

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

9.1. Основная литература

1. Засов А.В., Кононович Э.В. *Астрономия*, М., Физматлит, 2011, ISBN: 978-5-9221-0952-9, 256 с. Изд-во ЛАНЬ: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2370
2. *Фундаментальные космические исследования*. В 2 кн. Кн.1. *Астрофизика*, Под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Райкунова Г.Г., М., Физматлит, 2014, ISBN: 978-5-9221-1549-0, 452 с., Изд-во ЛАНЬ: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59705
3. Язев С.А. *Лекции о Солнечной системе*, М., Лань, 2011, ISBN: 978-5-8114-1253-2, 384 с. Изд-во ЛАНЬ: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=1557

9.2. Дополнительная литература

1. Гофман-Велленгоф Б., Мориц Г. *Физическая геодезия*. М., МИИГАиК, 2007, 426 с.
2. *Космический мусор*. В 2 кн. Кн.1. *Методы наблюдения и модели космического мусора*, Под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Райкунова Г.Г., М., Физматлит, 2014, ISBN: 978-5-9221-1503-2, 248 с. Изд-во ЛАНЬ: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59698
3. *Космический мусор*. В 2 кн. Кн.2. *Предупреждение образования космического мусора*, Под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Райкунова Г.Г., М., Физматлит, 2014, ISBN: 978-5-9221-1504-9, 188 с. Изд-во ЛАНЬ: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59699

9.3. Интернет-ресурсы:

Российская РСДБ-сеть http://www.agora.guru.ru?VAK-2010/files/565_New_VLBI.doc

IAU <http://www.iau.org/>

РСДБ-сети <http://www.quickiwiki.com/ru>

Сайт Международного астрономического союза (МАС)

http://www.galactic.name/articles/international_astronomical_union.php

Фонд знаний Ломоносов <http://www.lomonosov-fund.ru>

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Мультимедийная аудитория, вместимостью до 30 человек. Мультимедийная аудитория состоит из интегрированных инженерных систем с единой системой управления, оснащенная современными средствами воспроизведения и визуализации любой видео и аудио информации, получения и передачи электронных документов. Типовая комплектация мультимедийной аудитории состоит из: мультимедийного проектора, автоматизированного проекционного экрана, акустической системы, а также интерактивной трибуны преподавателя, включающей тач-скрин монитор с диагональю не менее 22 дюймов, персональный компьютер (с

техническими характеристиками не ниже Intel Core i3-2100, DDR3 4096Mb, 500Gb), конференц-микрофон, беспроводной микрофон, блок управления оборудованием, интерфейсы подключения: USB, audio, HDMI. Интерактивная трибуна преподавателя является ключевым элементом управления, объединяющим все устройства в единую систему, и служит полноценным рабочим местом преподавателя. Преподаватель имеет возможность легко управлять всей системой, не отходя от трибуны, что позволяет проводить лекции, практические занятия, презентации, вебинары, конференции и другие виды аудиторной нагрузки обучающихся в удобной и доступной для них форме с применением современных интерактивных средств обучения, в том числе с использованием в процессе обучения всех корпоративных ресурсов. Мультимедийная аудитория также оснащена широкополосным доступом в сеть интернет. Компьютерное оборудование имеет соответствующее лицензионное программное обеспечение.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО аспирантуры (Приказ Минобрнауки РФ от 30.07.2014 № 867) и с учетом рекомендаций по направлению подготовки.

Направление подготовки: 03.06.01 – Физика и астрономия
Профиль подготовки: 01.03.01 – Астрометрия и небесная механика

Автор: проф., д.ф.-м.н. (доцент) Кашеев Р.А.

Рецензент: доцент, к.ф.-м.н. (доцент) Соколова М.Г.

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий кафедрой: проф. Бикмаев И.Ф.

Протокол заседания кафедры № 1 от "29" августа 2014 г.

ОДОБРЕНО:

Учебно-методическая комиссия Института физики:

Протокол заседания УМК № 7 от "11" сентября 2014 г.

Приложения:

Приложение 1. Программа кандидатского экзамена по астрометрии и небесной механике (01.03.01)

Приложение 2. Образец дополнительной программы на кандидатский экзамен по специальности.

ПРОГРАММА-МИНИМУМ кандидатского экзамена по специальности

01.03.01 «Астрометрия и небесная механика»

по техническим и физико-математическим наукам

1. Системы координат

1. Явления прецессии, нутации, абберации и рефракции. Приведение на видимое место.
2. Методы определения основных астрометрических постоянных. Теоретические связи между постоянными. Системы астрономических постоянных 1896, 1964, 1976/80 г.г.
3. Геометрический, кинематический и динамический методы построения системы отсчета.
4. Измерение времени: шкала атомного времени IAT. Классические шкалы времени UTO, UT1, UT2, ET. Релятивистские шкалы времени TDT и TDB, TT, TCG, TCB.
5. Хранение и воспроизведение шкал времени и эталонных частот. Методы их распространения и синхронизации.

II. Наземная оптическая астрометрия

1. Меридианная астрометрия. Теория и устройство основных меридианных инструментов. Методы абсолютных и относительных определений координат.
2. Звездные каталоги и их систематические ошибки. Вывод фундаментальной системы звездных положений и собственных движений. Ориентировка системы координат. Относительные и сводные каталоги. Важнейшие фундаментальные каталоги.
3. Фотографическая астрометрия. Астрографы и приборы для измерения астронегативов. Измеренные и стандартные координаты. Методы Тернера и Шлезингера. Фотографические определения координат Луны, планет и ИСЗ.
4. Определение собственных движений и параллаксов звезд. Использование галактик для вывода ошибок системы собственных движений звезд.
5. Фотографические каталоги. Карта Неба, каталоги Астрономического общества (AGK), каталог PPM.
6. Использование ПЗС в астрометрии.
7. Техника лазерной локации ИСЗ и Луны.

III. Космическая астрометрия

1. Методы позиционных измерений небесных объектов с помощью космических аппаратов. Проект Hipparcos.
2. Интерферометрические методы в астрометрии. Наземные и космические интерферометры.
3. Спутниковые навигационные системы. Орбитальные и наземные технические средства.

IV. Радиоастрометрия

1. Радиоинтерферометры со сверхдлинной базой (РСДБ), устройство, принцип измерений. Корреляционная обработка сигналов в РСДБ.
2. Радиоастрономические методы определения координат объектов, неравномерности вращения Земли, движения полюсов и расстояний на поверхности Земли.
3. Небесная опорная система координат (ICRS) и земная опорная система координат (ITRF).
4. Радиолокационные и радиоинтерферометрические методы наблюдений тел солнечной системы.
5. Методы согласования оптических и радио- систем координат.

V. Вращение Земли и ее ориентация в пространстве

1. Уравнения Эйлера, Пуассона, Лиувилля.
2. Неравномерность вращения Земли вокруг оси. Движение полюсов.
3. Инструменты для изучения вращения Земли: пассажный инструмент, зенит-телескоп, призменная астролябия, фотографическая зенитная труба, РСДБ, лазерный дальномер, системы GPS и Глонасс.
4. Интерпретация движения полюсов и неравномерности вращения Земли. Короткопериодические, сезонные, вековые вариации вращения Земли. Чандлеровское движение полюса.
5. Международная Служба Вращения Земли (IERS), ее организации и задачи. Стандарты МСВЗ (IERS).
6. Изучение прецессии и нутации оси вращения Земли методами РСДБ.

VI. Аналитические методы небесной механики

1. Невозмущенное движение. Уравнения движения в задаче двух тел и их решение. Возмущенное движение. Уравнения движения n тел и их первые интегралы. Уравнения движения в координатах Якоби.
2. Уравнения движения Эйлера и Лагранжа в оскулирующих элементах. Теория возмущенного движения. Малые параметры в теории движения планет и спутников. Промежуточные орбиты. Разложение пертурбационной функции.
3. Интегрирование с помощью рядов по степеням времени (метод неопределенных коэффициентов и метод рядов Ли).
4. Формальное интегрирование уравнений движения в элементах промежуточной орбиты методом малого параметра Ляпунова—Пуанкаре. Малые знаменатели. Резонанс.
5. Теоремы Пуанкаре о ранге и классе возмущений. Сходимость в методе малого параметра.
6. Формальное интегрирование методом осреднения. Асимптотический характер метода осреднения.

7. Канонические преобразования. Метод Гамильтона-Якоби.
8. Метод преобразований Ли в теории возмущений. Теория вековых возмущений.
9. Уравнения поступательно-вращательного движения небесных тел. - Стационарные решения этих уравнений.

VII. Качественные методы небесной механики

1. Переменные действие—угол. Интегрируемые системы. Теорема Лиувилля Теоремы Брунса и Пуанкаре об интегрируемости задачи нескольких тел.
2. Сохранение фазового объема. Периодические орбиты. Методы Ляпунова и Пуанкаре. Функция последования.
3. Условно-периодические функции. Среднее значение. Инвариантные торы. Основные идеи метода Колмогорова—Арнольда- —Мозера.
4. Основы первого и второго методов Ляпунова определения устойчивости движения. Орбитальная устойчивость. Устойчивость по Лагранжу. Устойчивость по Пуассону.
5. Ограниченная задача трех тел. Интеграл Якоби. Топология поверхностей Хилла. Устойчивость точек либрации. Семейства периодических решений вблизи точек либрации.

VIII. Основы гравиметрии

1. Основы теории гравитационного потенциала. Представление потенциала в виде разложения по сферическим функциям. Сходимость разложения. Гравитационный потенциал Земли, Луны, планет. Масконы.
2. Основы теории фигуры Земли. Методы определения параметров гравитационного поля и фигуры.

IX. Движение спутников планет и искусственных спутников Земли

1. Возмущенное движение спутников. Промежуточная орбита. Возмущающие факторы в движении естественных спутников планет. Возмущающие факторы в движении искусственных спутников Земли.
2. Разложение возмущающей функции, обусловленной не центральностью гравитационного поля планеты. Возмущения от зональных гармоник. Возмущения от тессеральных и секториальных гармоник. Возмущающая функция от притяжения внешнего тела. Лунно-солнечные возмущения ИСЗ.
3. Интегрирование уравнений обобщенной задачи двух неподвижных центров. Характер движения. Формулы промежуточной орбиты. Возмущения на основе промежуточной орбиты обобщенной задачи двух неподвижных центров.
4. Задача Хилла и ее использование в теории движения.

5. Возмущения, вызываемые сопротивлением атмосферы планеты. Возмущения от светового давления и приливов в теле упругой планеты.

X. Определение орбит по результатам измерений

1. Постановка задачи определения орбит. Определение орбиты по двум положениям. Основы методов Лапласа и Гаусса определения орбиты по трем угловым наблюдениям.
2. Метод дифференциального уточнения параметров движения небесных тел из наблюдений. Метод наименьших квадратов при известной ковариационной матрице наблюдений. Метод коллокации. Метод наименьших модулей.
3. Построение условных уравнений при уточнении элементов орбит спутников из лазерных и радиотехнических наблюдений.

XI. Звездная динамика

1. Структура Галактики. Подсистемы Галактики.
2. Кинематика Галактики. Характеристики вращения и распределений остаточных скоростей.
3. Модели Галактики и орбиты звезд в них.
4. Динамика бесстолкновительных звездных систем. Уравнение Больцмана. Интегралы движения.
5. Теория движения в поле ротационно-симметричного потенциала. Поле направлений движения.
6. Фигуры равновесия небесных тел.

Приложение 2.
О Б Р А З Е Ц

УТВЕРЖДАЮ
Председатель Ученого Совета
Института физики

ФИО

(подпись)

Протокол № ____ от « ____ » _____ 20__ г.

Дополнительная программа

Для сдачи кандидатского экзамена по специальности _____

(шифр и наименование специальности)

аспиранта (соискателя) кафедры _____

(ФИО аспиранта, соискателя)

Тема диссертации: « _____ »

Вопросы:

1. _____

2. _____

....

15. _____

Литература

1. _____

2. _____

....

10. _____

Научный руководитель
(уч. степень, уч. звание, должность)

Ф.И.О

Соискатель

Ф.И.О

Рассмотрено на заседании кафедры
Протокол № _____ от _____ 201__ г.