Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ, АСТРОМЕТРИИ ИГРАВИМЕТРИИ

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета
МГУ
_____/ Н.Н. Сысоев /
«___» _____20 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

ПРАКИЧЕСКАЯ НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

Уровень высшего образования:
Специалитет

Направление подготовки:

03.05.01 Астрономия

Направленность (профиль) ОПОП:

Общая специальность

Квалификация «Специалист»

Форма обучения: Очная форма обучения

Рабочая программа рассмотрена и одобрена

Ученым советом физического факультета МГУ

(протокол №_____,)

Москва 20___

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по специальности 03.05.01 Астрономия.

Год (годы) приема на обучение_____

Автор–составитель:
Д.ф.-м.н. профессор Емельянов Николай Владимирович
Заведующий кафедрой
Д.ф.-м.н. профессор Жаров Владимир Евгеньевич

Аннотация к рабочей программе дисциплины
«Практическая Небесная Механика»

Дисциплина «**Практическая Небесная Механика**» является обязательной дисциплиной кафедры. На лекциях студенты знакомятся с процессом практического построения моделей движения небесных тел на основе наблюдений. Изучается процесс построения аналитических теорий и методы численного интегрирования уравнений движения. Целью изучения является умение строить модели движения планет, спутников и малых тел Солнечной системы и, в конечном счете, создавать эфемериды, которые являются как конечным продуктом исследований, так и главным инструментом для изучения окружающего космического пространства и освоения Солнечной системы. Курс сопровождается семинарскими занятиями, на которых студенты учатся самостоятельно осваивать методы вычислений в небесной механике, работать с библиографией и готовить к публикации научные статьи. Полученные знания студенты учатся использовать при выполнении задач специального практикума по небесной механике.

Разделы рабочей программы

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Форма обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Практическая небесная механика» реализуется на 5-ом курсе в 9-ом семестре и является составной частью профессионального блока вариативной части.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Необходимы знания математического анализа и начальное знакомство с дифференциальными уравнениями.

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	**Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)**
УК-1.Б	***З-1 Знать:*** фундаментальные законы небесной механики. ***З-2 Знать:*** методы построения моделей движения небесных тел на основе наблюдений. ***У-1Уметь:*** Строить модели движения планет и спутников. используя наблюдательные данные. ***У-2Уметь:*** Решать уравнения движения небесных тел методами теории возмущения и методами численного интегрирования. ***В-1 Владеть:*** методами, применяемыми в практической небесной механике. ***В-2 Владеть:*** методами работы с результатами астрометрических наблюдений.
ОПК-1.Б	***З-1 Знать:*** основные математические методы, используемые при построении моделей движения небесных тел. ***У-1Уметь:*** решать уравнения движения методами численного интегрирования ***У-2Уметь:*** строить математические модели движения небесных тел на основе наблюдений ***В-1 Владеть:*** навыками проведения научных исследований методами практической небесной механики.

1. **Форма обучения:** очная.

2. **Язык обучения:** русский.

3. **Содержание дисциплины**

Программа и содержание спецкурса «Практическая небесная механика» по темам

Тема 1. Предмет практической небесной механики. Основные понятия и особенности.

Механическая модель. Законы движения и законы взаимодействия. Наблюдения. Измеряемые величины. Определяемые параметры. Точность наблюдений. Время. Введение систем координат. Общая схема построения моделей движения небесных тел на основе наблюдений. Особые свойства необходимых наблюдений

Тема 2. Методы построения аналитических теорий движения небесных тел.

Основной принцип теории возмущений. Применения теории возмущений. Порядок малости. Разложение возмущающей функции, обусловленной несферичностью планеты. Разложение возмущающей функции, обусловленной притяжением внешнего тела. Обобщенная задача двух неподвижных центров. Возмущающие факторы в движении искусственных спутников Земли. Вековые и периодические возмущения. Формулы вековых возмущений углового расстояния перицентра от узла и долготы узла, как явных функций от большой полуоси, эксцентриситета и наклона орбиты. Модель прецессирующего эллипса. Постоянное возмущение большой полуоси орбиты. Возмущения элементов орбит при малых эксцентриситетах. Влияние вязко-упругих приливов в телах планеты и спутника на орбитальное движение. Примеры построенных моделей движения небесных тел. Планетные теории Леверье и Ньюкома. Современные аналитические теории движения планет..

Тема 3. Методы численного интегрирования уравнений движения небесных тел.

Основной принцип одношаговых методов численного интегрирования. Метод ломаных Эйлера. Проблема оценки точности. Зависимость точности от шага интегрирования.. Проблема выбора шага интегрирования. Автоматический выбор шага. Метод Рунге-Кутты. Структура алгоритма применения методов численного интегрирования для построения модели движения небесного тела. Метод и программа Эверхарта. Метод и программа Беликова. Хранение результатов численного интегрирования для вычисления эфемерид. Современные теории движения планет.

Тема 4. Позиционные наблюдения небесных тел.

Способы позиционных наблюдений. Примеры измеряемых величин при наблюдениях небесных тел. Связь измеряемых величин с координатами небесных тел. Системы координат при наблюдениях. Шкалы времени. Наземные наблюдения. Наблюдения с помощью космических аппаратов. Спекл-интерферометрические наблюдения. Лазерные наблюдения ИСЗ. Допплеровские наблюдения ИСЗ. Угломерные наблюдения планет и астероидов. Абсолютные измерения координат спутников планет. - Относительные измерения спутников планет. Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой. Использование каталожных координат звезд. Причины ограничения точности абсолютных и относительных астрометрических наблюдений небесных тел. Базы данных наблюдений.

Тема 5. Построение моделей движения небесных тел на основе наблюдений.

Связь измеряемой величины с координатами небесных тел. Связь координат с параметрами движения. Метод дифференциального уточнения. Составление условных уравнений. Алгоритмы фильтрации. Метод наименьших квадратов. Ковариационная матрица наблюдений. Ковариационная матрица параметров. Зависимость точности модели от числа наблюдений. Плохая обусловленность. Вычисление изохронных производных. Уточнение

массы возмущающего тела из астрометрических наблюдений. Назначение весов условным уравнениям. Отбрасывание грубых наблюдений.

Тема 6. Извлечение позиционных данных из фотометрии естественных спутников планет во время из взаимных покрытий и затмений.

Явления взаимных покрытий и затмений спутников планет. Фотометрическая модель явления. Законы рассеяния света на поверхностях небесных тел. Составление уравнений для извлечения позиционных данных из фотометрии спутников во время явлений. Точность получаемых астрометрических данных. Международные кампании наблюдений

Тема 7. Оценка точности моделей движения небесных тел.

Оценка точности методом вариации ошибок наблюдений. Оценка точности методом вариации орбитальных параметров. Метод «бутстрап» выборок. Обзор выполненных в мире оценок точности моделей движения далеких спутников больших планет. Открытия и потери спутников.

.

Тема 8 Динамические параметры тел Солнечной системы

Классификация тел Солнечной системы. Расстояния и размеры тел. Номенклатура планет, астероидов и спутников планет. Свойства движения. Возмущающие факторы. Открытие Нептуна. Открытие спутника Плутона Харон.

Тема 9.\ Вращение планет и спутников.

Сжатие небесных тел. Факторы, влияющие на вращение. Вращение естественных спутников. Хаотическое вращение Гипериона. Физическая Либрация Луны.

Тема 10. Разработка эфемерид небесных тел

Научные центры в мире, где разрабатываются эфемериды небесных тел: JPL, IMCCE, ИПМ РАН. Массивы используемых наблюдений. Эфемериды астероидов. Способы представления эфемерид.

Тема 11. Актуальные нерешенные задачи практической небесной механики.

Препятствия к улучшению точности эфемерид Марса. Проблемы хаотического вращения некоторых малых тел Солнечной системы. Проблемы детектирования диссипации механической энергии орбитального движения и вращения малых тел Солнечной системы. Связь динамики тел Солнечной системы с планетологией. Проблема эволюции орбит в Солнечной системе. Связь вращательно-поступательного движения Земли с геологией и биосферой.

Тема 12 Информационные ресурсы практической небесной механики.

Службы эфемерид планет, астероидов и спутников планет. Система SPICE. Международная служба вращения Земли. Система SOFA. Эфемеридный сервер MULTI-SAT/ Международный центр малых планет. Виртуальные обсерватории.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Практическая небесная механика	3	108	72	36	36	36

8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Практическая небесная механика» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса; семинарские занятия, предусматривающие углубленное изучение и обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации. С курсом «Практическая небесная механика» связан специальный практикум по небесной механике.

№ темы	**Наименование раздела дисциплины**	**Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы**					**Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации**
		Всего часов	**Лекции**	**Научно-практические занятия**	**Семинары**	**Самостоятельная работа**	

1	Основные понятия	**12**	**4**	**-**	**4**	**4**	Собеседование, опрос
2	Аналитические теории	**16**	**6**	**-**	**6**	**4**	
3	Численное интегрирование	**12**	**4**	**-**	**4**	**4**	
4	Наблюдения	**6**	**2**	**-**	**2**	**2**	
5	Построение моделей движения	**10**	**4**	**-**	**4**	**2**	
6	Взаимные покрытия и затмения	**12**	**4**	**-**	**4**	**4**	
7	Оценка точности	**6**	**2**	**-**	**2**	**2**	
8	Динамические параметры Солнечной системы	**6**	**2**	**-**	**2**	**2**	
8	Вращение небесных тел	**6**	**2**		**2**	**2**	
10	Эфемериды небесных	**8**	**2**	**-**	**2**	**2**	
11	Нерешенные задачи	**6**	**2**	**-**	**2**	**2**	
12	Информационные ресурсы	**6**	**2**	**-**	**2**	**2**	
	Промежуточная аттестация	**4**				**4**	Экзамен в устной форме
ИТОГО:		**108**	**36**	**-**	**36**	**36**	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Практическая небесная механика» осуществляется на лекциях и семинарских занятиях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Практическая небесная механика» проводится в форме экзамена в устной форме.

Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
Оценочные средства текущего контроля		

Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как специальная беседа по тематике предыдущей лекции и рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний аспиранта по изученной теме.	Список экзаменационных вопросов
Оценочные средства промежуточной аттестации		
Письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену
Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков по для оценивания и анализа различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	Требования к порядку проведения собеседования

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	**Критерии оценивания результатов обучения**			
	2	**3**	**4**	**5**
ЗНАТЬ: Фундаменталь-ные законы небесной механики, готовность ответить на дополнительн ые вопросы по программе курса УК-1.Б З-1	Отсутствие знаний фундаментальн ых законов небесной механики.	Иметь некоторое представление о практической небесной механике.	Знания фундаментальн ых законов, но пробелы в осведомлен-ности по программе курса	Систематические знания и исчерпывающая осведомленность по программе курса
ЗНАТЬ: основные определения и понятия небесной механики УК-1.Б З-2	Отсутствие знаний основных понятий небесной механики	Некоторое представление об основных понятиях практической небесной механики.	Иметь представление об основных понятиях практической небесной механики. Но имеются	Систематические знания основных понятий практической небесной механики и осведомленность по программе

			пробелы по ряду вопросов.	курса
ЗНАТЬ: основные математичес-кие методы практической небесной механики ОПК-1.Б З-1	Отсутствие знаний основных математичес-ких методов практической небесной механики.	Только некоторая осведомлен-ность об основных математичес-ких методах практической небесной механики.	Знания и осведомленнос ть об основных математичес-ких методах практической небесной механики, но с пробелами по ряду вопросов.	Систематические знания и осведомленность об основных математических методах практической небесной механики.
УМЕТЬ: составлять уравнения для практического определения параметров движения небесных тел, критически анализируя данные. УК-1.Б У-1	Отсутствие умения строить уравнения для определения параметров. Никакой ориентации в этом деле.	Иметь некоторое представление об уравнениях для определения параметров движения небесных тел.	В целом уметь составлять уравнения, но с некоторыми ошибками. Не критически анализировать данные.	Успешное и систематическое умение строить уравнения для определения параметров из наблюдений. Критически оценивать и правильно подбирать данные наблюдений.
УМЕТЬ: Планировать исследования путем составления уравнений и формулировки путей решения задач практической небесной механики. УК-1.Б У-2	Отсутствие умения планировать исследования в области практической небесной механики. Отсутствие ориентации в методах.	В целом умение планировать исследования в области практической небесной механики, Значительные пробелы в знаниях методов.	В целом хорошая ориентация в методах решения задач. Но пробелы по ряду вопросов планирования решения задач.	Умение систематически планировать определение параметров движения небесных тел из наблюдений. Умение подбирать необходимые исходные данные.
УМЕТЬ: решать типовые задачи практической небесной механики ОПК-1.Б У-1	Отсутствие умения решать типовые задачи. Отсутствие ориентации в выборе методов.	Иметь некоторое представление о решении типовых задач практической небесной механики. Значительные пробелы в знании методов.	Умение в целом решать типовые задачи, но имеются пробелы в знании методов и выборе исходных данных.	Успешное и систематическое умение решать типовые задачи. Умение анализировать и подбирать необходимые исходные данные.

УМЕТЬ: строить математичес-кие модели и теории движения небесных тел ОПК-1.Б У-2	Отсутствие умения строить математические модели и теории движения небесных тел.	Не системати-чезкое умение строить математичес-кие модели движения небесных тел. Не достаточная ориентация в методах и исходных данных.	В целом хорошая ориентация при построении моделей движения небесных тел, но имеются отдельные пробелы в этом умении.	Систематическое умение строить математические модели движения небесных тел на основе наблюдений. Хорошая ориентация в исходных данных.
ВЛАДЕТЬ: математически м аппаратом, применяемым в практической небесной механике. УК-1.Б В-1	Отсутствие владения математически м аппаратом, применяемым в практической небесной механике.	Владение только отдельными сведениями о математичес-ком аппарате, применяемом в практической небесной механике.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы во владении необходимым математичес-ким аппаратом,	Успешное и систематическое владение математическим аппаратом, применяемым в практической небесной механике.
ВЛАДЕТЬ: методами теоретического исследования движения небесных тел. УК-1.Б В-2	Отсутствие владения методами теоретического исследования движения небесных тел.	В целом некоторая ориентация, но не системати-ческое владение методами теоретического исследования движения небесных тел.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы во владении методами теоретического исследования движения небесных тел.	Успешное и систематическое владение методами теоретического исследования движения небесных тел.
ВЛАДЕТЬ: навыками проведения работ по построению моделей движения небесных тел на основе наблюдений. ОПК-1.Б В-1	Отсутствие навыков проведения работ по построению моделей движения небесных тел на основе наблюдений.	В целом успешное, но не систематическо е владение навыками проведения работ по построению моделей движения небесных тел на основе наблюдений.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы, владение навыками проведения работ по построению моделей движения небесных тел на основе наблюдений.	Успешное и систематическое владение навыками проведения работ по построению моделей движения небесных тел на основе наблюдений.

12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся

Контрольные вопросы можно найти по адресу:
http://www.sai.msu.ru/neb/kaf/pcm/PCMquest.pdf

13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Материалы промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к экзамену можно найти по адресу:
http://www.sai.msu.ru/neb/kaf/pcm/PCMquest.pdf

14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

Основная литература.

1. Н.В.Емельянов Практическая небесная механика. Учебное пособие. Физический факульте МГУ. 2018 г. 270 с.

Дополнительная литература.

1. *Дубошин Г.Н.* Небесная механика. Основные задачи и методы. Учебник для студентов университетов, обучающихся по специальности "Астрономия" . Издание 3-е, дополненное. М: Наука, 1975 . 800 с
2. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию. М: Наука, 1968 . 800 с.
3. Емельянов Н.В. Динамика естественных спутников планет на основе наблюдений. Фрязино: Век 2. 2019 – 576 с.

Интернет-ресурсы.

1.http://www.sai.msu.ru/neb/kaf/pcm/pcm.htm
2.http://www.sai.msu.ru/neb/nss/indexr.htm

Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Астррономия».

Курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.