

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
декан физического факультета
С.Н. Филимонов

Рабочая программа дисциплины

Методы динамики спутниковых систем

по направлению подготовки

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
«Фундаментальная и прикладная физика»

Форма обучения
Очная

Квалификация
Магистратура

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
О.Н. Чайковская

Председатель УМК
О.М. Сюсина

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ПК-1 – Способен самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта;

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

– ИПК-1.1 – Знает основные стратегии исследований в выбранной области физики, критерии эффективности, ограничения применимости;

– ИПК-1.2 – Умеет выделять и систематизировать основные цели исследований в выбранной области физики, извлекать информацию из различных источников, включая периодическую печать и электронные коммуникации, представлять её в понятном виде и эффективно использовать.

2. Задачи освоения дисциплины

- изучение основных форм представления уравнений движения околоземных космических объектов;
- знакомство с физическими и математическими моделями сил, действующих на эти небесные тела;
- овладение методами аналитического и численного моделирования движения рассматриваемых объектов;
- знакомство с методами качественного анализа динамики спутниковых систем;
- овладение методами высокоточного прогнозирования движения околоземных космических объектов.

3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Семестр 3, зачет с оценкой.

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Небесная механика Специальный лабораторный практикум по динамике искусственных спутников Земли

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 з.е., 180 часов, из которых:

– лекции: 8 ч.;

– практические занятия: 24 ч.;

в том числе практическая подготовка: 16 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Введение

Динамика ИСЗ, возникновение и тенденции развития, применяемые в теории движения околоземных объектов

Тема 2. Дифференциальные уравнения движения (ДУД) в аналитических и численных моделях

Системы координат. Формы представления уравнений движения ИСЗ

Тема 3. Модели сил в аналитических и численных методах решения ДУД

Формы представления гравитационного потенциала, Стандартные Земли. Модели других сил: притяжение внешних тел, приливные деформации в теле Земли, световое давление, атмосферное торможение, релятивистские эффекты.

Тема 4. Аналитические методы решения ДУД, применяемые в задачах околоземной динамики

Метод малого параметра. Ляпунова-Пуанкаре. Обобщенный метод Лагранжа вариации произвольных постоянных. Принципы построения методов осреднения. Метод Цейделя и метод рядов Ли. Решение главной проблемы теории движения ИСЗ методом рядов Ли

Тема 5. Методы численного моделирования движения ИСЗ.

Особенности алгоритмов численного моделирования движения околоземных объектов. Численное исследование структуры возмущений орбитального движения ИСЗ. Высокоточное прогнозирование движения ИСЗ, в том числе больших систем объектов. Моделирование движения, распределения и орбитальной эволюции фрагментов космического мусора.

Тема 6. Исследование динамической структуры околоземного космического пространства (ОКП)

Орбитальные резонансы в ОКП. Вековые резонансы в ОКП. Описание общей динамической структуры ОКП.

Тема 7. Определение динамических параметров объектов по данным позиционных и фотометрических измерений.

Структура позиционных и фотометрических измерений ИСЗ численная методика определения вектора состояния и парусности объекта по позиционным наблюдениям. Определение площади миделевого сечения объекта по данным фотометрических измерений. Оценка массы объекта по данным позиционных и фотометрических измерений

Тема 8. Элементы поступательно-вращательного движения ИСЗ

Вывод приближенных уравнений поступательно-вращательного движения ИСЗ. Особенности влияния вращательного движения ИСЗ на поступательное через изменение силы светового давления

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения контрольных работ, тестов по лекционному материалу, выполнения домашних заданий, и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

Примерный перечень контрольных вопросов для текущей аттестации

Контрольные вопросы к теме 2

1. Системы координат, используемые в теории движения ИСЗ.
2. Особенности различных представлений уравнений движения ИСЗ.

Контрольные вопросы к теме 3

3. Свойства разложения гепотенциала в ряд по сферическим функциям.
4. Рекуррентные алгоритмы для вычисления шаровых функций V_{nm}
5. Природа возмущения от приливных деформаций центрального тела и способы учета этих возмущений.
6. Возмущения от третьего тела
7. Возмущения от светового давления
8. Возмущения от сопротивления атмосферы

Контрольные вопросы к теме 4

9. Разложение возмущающей функции в ряд. Особенности представления возмущающей функции в аналитических теориях.
10. Главная проблема в теории движения ИСЗ
11. Типы промежуточных орбит в теории движения ИСЗ.
12. Возмущения от гепотенциала и частотные резонансы.
13. Специфика учета лунно-солнечных возмущений в аналитических теориях движения ИСЗ.
14. Существо метода малого параметра. Принцип вывода уравнений метода. Обобщенный метод Лагранжа вариации произвольных постоянных
15. Структура уравнений небесной механики. Медленные и быстрые переменные.
16. Общие принципы построения методов осреднения уравнений движения небесных тел
17. Каноническое преобразования от исходных переменных к осредненным в методе Делоне-Цайпеля
18. Производящая функция и ее особенности.
19. Особенности метода усреднения с помощью рядов и преобразования Ли
20. Сравнение между собой преобразования от исходных переменных к осредненным в методах Делоне-Цайпеля и рядов и преобразований Ли
21. Существо методов качественного анализа возмущенного движения
22. Частотные резонансы и их влияние на орбитальную эволюцию.
23. Структура позиционных и фотометрических наблюдений ИСЗ.

Контрольные вопросы к теме 5

24. Постановка задачи численного моделирования движения ИСЗ
25. Сравнительная характеристика различных численных методов решения ОДУ
26. Методика численного исследования структуры возмущений орбитального движения ИСЗ.
27. Классификация орбит ИСЗ по действию орбитальных возмущений.
28. Особенности высокоточного прогнозирования движения ИСЗ
29. Особенности численного моделирования больших систем околоземных объектов.
30. Распределение объектов космического мусора в околоземном пространстве.
31. Особенности орбитальной эволюции фрагментов космического мусора в зоне ГЕО.
32. Особенности орбитальной эволюции отработавших КА информационных спутниковых систем. ГЛОНАСС и GPS.

Контрольные вопросы к теме 6

33. Понятие орбитального резонанса в динамике ИСЗ. Понятие векового резонанса в динамике ИСЗ. Общие сведения о распространенности в орбитальных и вековых резонансов в ОКП.

Контрольные вопросы к теме 7

34. Структура позиционных и фотометрических измерений ИСЗ.
35. Особенности численной методики определения вектора состояния и парусности объекта по позиционным наблюдениям.
36. Определение площади миделевого сечения объекта по данным фотометрических измерений.
37. Методика оценки массы объекта по данным позиционных и фотометрических измерений
38. Возможности совместного использования позиционных и фотометрических наблюдений для определения динамических параметров околоземных объектов.

Тема 8. Элементы поступательно-вращательного движения ИСЗ

39. Вывод приближенных уравнений поступательно-вращательного движения ИСЗ.
40. Как проявляется влияние вращательного движения ИСЗ на поступательное

Выполнение всех заданий текущего контроля обязательно.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет с оценкой в первом семестре проводится в письменной форме по билетам. Билет содержит теоретический вопрос и две задачи. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Перечень теоретических вопросов

1. Инерциальная и вращающаяся системы координат, используемые в теории движения ИСЗ.
2. Орбитальные системы координат
3. Уравнения движения в прямоугольных координатах
4. Уравнения движения в кеплеровых оскулирующих элементах.
5. Уравнения в канонических переменных
6. Разложение гепотенциала в ряд по сферическим функциям.
7. Формы представления гепотенциала
8. Рекуррентные алгоритмы для вычисления шаровых функций V_{nm}
9. Природа возмущения от приливных деформаций центрального тела и способы учета этих возмущений в соответствии с рекомендациями IERS/.
10. Возмущения от третьего тела. Способы вычисления координат третьего тела.
11. Возмущения от светового давления. Теневая функция
12. Возмущения от сопротивления атмосферы. Модели вычисления плотности атмосферы
13. Разложение возмущающей функции в ряд Пуассона. Особенности представления возмущающей функции в аналитических теориях.
14. Главная проблема в теории движения ИСЗ. Вековые изменения орбит ИСЗ
15. Типы промежуточных орбит в теории движения ИСЗ.
16. Возмущения от гепотенциала, частотные резонансы и их влияние на динамику ИСЗ
17. Алгоритм учета лунно-солнечных возмущений в аналитических теориях движения ИСЗ.
18. Метод малого параметра. Вывод уравнений метода
19. Обобщенный метод Лагранжа вариации произвольных постоянных
20. Медленные и быстрые переменные в задачах динамики околоземных объектов

21. Особенности применения методов усреднения с помощью канонических преобразований в задачах динамики ИСЗ
22. Сравнительная характеристика методов усреднения.
23. Вековые резонансы и их влияние на орбитальную эволюцию.
24. Постановка задачи численного моделирования движения ИСЗ
25. Численные методы решения ОДУ, используемые в задачах высокоточного моделирования движения ИСЗ
26. Методика численного исследования структуры возмущений орбитального движения ИСЗ.
27. Классификация орбит ИСЗ по, высоте полета эксцентриситету и наклонению орбит.
28. Численное моделирование больших систем околоземных объектов.
29. Распределение объектов космического мусора в околоземном пространстве.
30. Характеристики орбитальной эволюции фрагментов космического мусора в зоне ГЕО.
31. Особенности орбитальной эволюции отработавших КА информационных спутниковых систем. ГЛОНАСС и GPS.

Примеры задач:

1. Задача 1. Выявить резонансные объекты из совокупности околоземных объектов
Дано: перечень больших полуосей орбит.
Требуется: выделить резонансные орбиты
2. Задача 2. Классификация объектов.
Дано: перечень орбитальных параметров
Требуется: классифицировать орбиты объектов
3. Задача 3. Дан перечень возмущений, действующих на околоземный объект.
Требуется сформулировать аналитические подходы к прогнозированию движения объекта
4. Задача 4. Дан перечень возмущений, действующих на околоземный объект.
Требуется сформировать численный алгоритм прогнозирования движения объекта

Результаты зачета с оценкой определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».
Применяется балльная система оценки.

11. Учебно-методическое обеспечение

- а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=00000>
- б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

- а) основная литература:
 1. Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А. Теория движения искусственных спутников Земли. Аналитические и численные методы: учебное пособие. Томск. Изд-во Том. ун-та. 2016.–256 с.
 2. Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит небесных тел. Томск. Издательский дом Том. ун-та. 2015.–336 с.
 3. Распопова Н.В., Давыденко А.А. Задачи движения тел в космических системах. Часть I: учебное пособие. С-Петербург, Изд-во «СОЛО» 2015.–73 с.
 4. Суханов А.А. Астродинамика. Москва, ИКИ РАН, серия «Механика, управление автоматика». 2010.–202 с.

- б) дополнительная литература:
5. Брумберг В.А. Аналитические алгоритмы небесной механики. М.: Наука, 1980. 208 с.
 6. Холшевников К.В. Асимптотические методы небесной механики. Л.: Изд-во Лен. ун-та, 1985. 208 с.

в) ресурсы сети Интернет:

- Википедия – свободная энциклопедия <https://ru.wikipedia.org/?l=>
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS — Global Navigation Satellite Systems: [GPS, GLONASS, Galileo, and more](#). Springer-Verlag Wien. 2008. Time modified: 2016-03 (English, pdf)

13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office OneNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);
- публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

- Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>
- Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
- ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>
- ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного и семинарского типа индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате («Актру»).

15. Информация о разработчиках

Бордовицына Татьяна Валентиновна, доктор физико-математических наук, профессор, Томский государственный университет, профессор.