

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

**Динамика космического полёта**

по направлению подготовки

**03.03.02 Физика**

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

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Бакалавриат**

Год приема  
**2025**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
С.Н. Филимонов

Председатель УМК  
О.М. Сюсина

Томск – 2025

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-2 Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;.

ПК-1 Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 2.2 Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования

ИПК 1.1 Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Знакомство с основными понятиями динамики искусственных спутников Земли (ИСЗ), уравнениями движения, аналитическими и численными методами их решения, а также различными способами представления действующих на ИСЗ сил;

– Формирование основных представлений о практическом применении методов теории движения ИСЗ.

## **3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, является обязательной для изучения.

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

Седьмой семестр, экзамен

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Небесная механика, Технологии программирования

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часа, из которых:

– лекции: 32 ч.;

– семинарские занятия: 0 ч.

– практические занятия: 32 ч.;

– лабораторные работы: 0 ч.

в том числе практическая подготовка: 0 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам**

**Тема 1. Введение**

Особенности курса динамики ИСЗ. Связь с другими астрономическими дисциплинами

**Тема 2. Системы координат, используемые в космической геодезии**

– Небесная невращающаяся система координат, геоцентрическая общеземная система координат.

– Методы создания астрономических систем координат.

**Тема 3. Дифференциальные уравнения движения (ДУД) в аналитических и численных моделях**

– Уравнения движения в прямоугольных координатах

– Уравнения в оскулирующих кеплеровых элементах.

– Каноническая форма уравнений движения ИСЗ.

**Тема 4. Модели сил в аналитических и численных методах решения ДУД**

– Гравитационное поле Земли.

– Формы представления геопотенциала

– Модели сил, имеющих потенциал

– Модели сил, не имеющих потенциала.

**Тема 5. Аналитические методы решения ДУД**

– Главная проблема теории движения ИСЗ и способы ее решения

– Принципы разложения возмущающей функции в ряд.

– Типы промежуточных орбит в динамике ИСЗ

– Применение обобщенного метода Лагранжа вариации произвольных постоянных в задачах динамики ИСЗ

– Методы осреднения ДУД в задачах динамики ИСЗ.

– Обзор существующих высокоточных аналитических теорий движения ИСЗ.

**Тема 6. Методы численного моделирования движения ИСЗ.**

– Особенности применения численных методов решения ДУД в задачах динамики ИСЗ.

– Построение высокоточных численных моделей движения ИСЗ. Обзор существующих моделей.

**Тема 7. Численное моделирование больших систем околоземных объектов**

– Особенности моделирования больших систем околоземных объектов. Использование параллельных вычислений.

– Описание «Численной модели движения систем ИСЗ» и примеры ее применения

**Тема 8. Построение численно-аналитических методов исследования динамики ИСЗ.**

– Примеры численно-аналитических для исследования и прогнозирования движения ИСЗ алгоритмов и описание результатов их использования.

**9. Текущий контроль по дисциплине**

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения контрольных работ, докладов студентов (в течение семестра каждый студент должен сделать не менее одного доклада), выполнения домашних заданий, и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

В случае пропуска занятия, студент получает задание по пропущенной теме.

Оценка текущей успеваемости определяется как среднее арифметическое из оценки учебной деятельности студента.

### Оценивание текущей успеваемости

| Оценка              | Критерий оценивания            |
|---------------------|--------------------------------|
| отлично             | среднее арифметическое 4.7-5   |
| хорошо              | среднее арифметическое 3.7-4.6 |
| удовлетворительно   | среднее арифметическое 3-3.6   |
| неудовлетворительно | среднее арифметическое <3      |

Доклад – это продукт самостоятельной или групповой работы студента (студентов), представляющий собой публичное выступление по представлению полученных результатов, демонстрирующий способность студента осуществлять сбор и обработку научно-технической информации, умение работать с различными видами информации, умение формулировать результаты в виде обзоров с выводами.

Примеры вопросов из контрольных работ:

1. Что такое инерциальная система координат.
2. Как задается небесная инерциальная система координат.
3. В каких движениях участвует земная ось.
4. С чем связано движение полюса эклиптики.
5. Как задается переход от прямоугольных координат, отнесенных к средней небесной системе эпохи каталога  $T$  к прямоугольным координатам эпохи наблюдений  $t$ .
6. Как реализуются системы небесных координат в фундаментальных каталогах FK5 и FK6.
7. Что такое международная небесная система отсчета ICRF.
8. Как задаются земные геоцентрические системы координат.
9. Как вычислялось международное условное начало (МУН) и как оно реально задается.
10. Определите геоцентрическую земную систему координат.
11. Что такое международная земная система отсчета ITRF.
12. Запишите связь между истинной небесной системой и общеземной системой.

Пример практического задания

Используя данные, приведенные в последнем параграфе лекции, классифицируйте приведенные в таблице объекты. Затем, вычислите периоды их обращения вокруг Земли и выделите те из них, которые движутся в резонансе с вращением Земли. Это означает, что отношение периода суточного вращения Земли и периода обращения спутника можно представить, как  $p/q$ , где  $p$  и  $q$  – целые числа. Запишите эти резонансные соотношения.

| № | Большая полуось, км | Эксцентриситет | Наклонение градусы | №  | Большая полуось, км | Эксцентриситет | Наклонение градусы |
|---|---------------------|----------------|--------------------|----|---------------------|----------------|--------------------|
| 1 | 7000                | 0,001          | 60,0               | 6  | 42165               | 0,001          | 9,0                |
| 2 | 12796               | 0,02           | 30,0               | 7  | 42000               | 0,001          | 0,0                |
| 3 | 16733               | 0.001          | 120,0              | 8  | 66933               | 0,01           | 90,0               |
| 4 | 26562               | 0,001          | 55,0               | 9  | 123291              | 0,75           | 60,0               |
| 5 | 27000               | 0,75           | 60,0               | 10 | 154294              | 0,1            | 5,0                |

$$n = \sqrt{\mu_T / a^3}, \text{ а также } n = 2\pi / T, \mu_T = 3.968 \cdot 10^{14} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-2}$$

Здесь  $n$  есть среднее движение спутника,  $\mu_T$  – гравитационная постоянная Земли (произведение универсальной гравитационной постоянной на массу Земли), а  $T$  – период

обращения спутника по орбите. При вычислении обращайте внимание на размерности величин.

## 10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Экзамен проводится в устной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из двух частей (одного теоретического вопроса и практического задания). Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Билеты составлены таким образом, чтобы проверить освоение обучающимся дисциплины по индикаторам: ИОПК 2.2; ИПК 1.1.

Каждая выполняемая часть экзаменационного билета оценивается по системе: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»

Оценка промежуточной аттестации определяется как среднее арифметическое из оценок за выполнение заданий билета и оценки текущей успеваемости в соответствии с таблицей, приведенной ниже, при условии, что все оценки не ниже «удовлетворительно». В случае, если одна из оценок «неудовлетворительно», общая оценка не может быть выше «удовлетворительно».

Оценивание промежуточной аттестации

| Оценка              | Критерий оценивания                                                                                                     |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| отлично             | среднее арифметическое 4.7-5                                                                                            |
| хорошо              | среднее арифметическое 3.7-4.6                                                                                          |
| удовлетворительно   | среднее арифметическое 3-3.6<br>и/или одна из оценок на экзамене и итоговая за текущий контроль - «неудовлетворительно» |
| неудовлетворительно | среднее арифметическое $<3$ ,<br>(от двух и более оценок «неудовлетворительно»)                                         |

Примерный перечень теоретических вопросов, входящих в состав билетов на экзамене:

1. Разложение гeпотенциала в ряд по сферическим функциям.
2. Формы представления геопотенциала
3. Рекуррентные алгоритмы для вычисления шаровых функций  $V_{nm}$
4. Природа возмущения от приливных деформаций центрального тела и способы учета этих возмущений в соответствии с рекомендациями IERS.
5. Возмущения от третьего тела. Способы вычисления координат третьего тела.
6. Возмущения от светового давления. Теневая функция
7. Возмущения от сопротивления атмосферы. Модели вычисления плотности атмосферы
8. Разложение возмущающей функции в ряд Пуассона. Особенности представления возмущающей функции в аналитических теориях.
9. Главная проблема в теории движения ИСЗ. Вековые изменения орбит ИСЗ
10. Типы промежуточных орбит в теории движения ИСЗ.
11. Возмущения от геопотенциала, частотные резонансы и их влияние на динамику ИСЗ.

12. Алгоритм учета лунно-солнечных возмущений в аналитических теориях движения ИСЗ.
13. Обобщенный метод Лагранжа вариации произвольных постоянных
14. Медленные и быстрые переменные.
15. Принципы построения методов осреднения уравнений движения небесных тел
16. Метод Делоне-Цайпеля. Каноническое преобразования от исходных переменных к осредненным. Производящая функция и ее особенности.
17. Метод Хори-Депри усреднения с помощью рядов и преобразования Ли
18. Сравнительная характеристика методов усреднения.
19. Методы качественного анализа возмущенного движения
20. Вековые резонансы и их влияние на орбитальную эволюцию.
21. Постановка задачи численного моделирования движения ИСЗ
22. Численные методы решения ОДУ, используемые в задачах высокоточного моделирования движения ИСЗ
23. Методика численного исследования структуры возмущений орбитального движения ИСЗ.
24. Классификация орбит ИСЗ по, высоте полета эксцентриситету и наклонению орбит.
25. Численное моделирование больших систем околоземных объектов.
26. Распределение объектов космического мусора в околоземном пространстве.
27. Характеристики орбитальной эволюции фрагментов космического мусора в зоне ГЕО.
28. Орбитальной эволюции отработавших КА информационных спутниковых систем. ГЛОНАСС и GPS.

#### **11. Учебно-методическое обеспечение**

- а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=32986>
- б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.
- в) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

#### **12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет**

- а) основная литература:
  - Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А.. Теория движения искусственных спутников Земли. Аналитические и численные методы: учебное пособие. Томск. Изд-во Том. ун-та. 2016.–262 с.
  - Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит небесных тел. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2015. 336 с.
  - Бордовицына Т.В. Технологии глобального позиционирования (GPS/ГЛОНАСС)/Электронное учебное пособие. Томск.2007 URL: <http://astro.tsu.ru/TGP/index.html>
  - ИКД ГЛОНАСС. Общее описание системы с кодовым разделением. Редакция 1.0 –М.: АО «Российские космические системы» 2016. 133 с. URL: <https://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/ghonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument/>
- б) дополнительная литература:
  - Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А.. Теория движения искусственных спутников Земли. Аналитические и численные методы: учебное пособие. Томск. Изд-во Том. ун-та. 2007.–220 с.

- Аксенов Е.П. Теория движения искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1977. 360 с.
- Бордовицына Т.В. Современные численные методы в задачах небесной механики. М.: Наука, 1984. 136 с.
- Брумберг В.А. Аналитические алгоритмы небесной механики. М.: Наука, 1980. 208 с.
- Flury J., Rummel R. Future Satellite Gravimetry and Earth Dynamics. Springer. 2006. 160 p
- Beutler G. Methods of Celestial Mechanics 2: Application to Planetary system, Geodynamics and Satellite Geodesy. : Springer. 2005. 452 p

- в) ресурсы сети Интернет:
- открытые онлайн-курсы
- Сайт кафедры <http://astro.tsu.ru>
- Официальный сайт Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения АО ЦНИИмаш <https://www.glonass-iac.ru/about/feedback/>

### **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 On-eNote, 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                                                                                                  | – |
| <a href="http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&amp;theme=system">http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&amp;theme=system</a> |   |
| – Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ                                                                                                    | – |
| <a href="http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index">http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index</a>                           |   |
| – ЭБС Лань – <a href="http://e.lanbook.com/">http://e.lanbook.com/</a>                                                                        |   |
| – ЭБС Консультант студента – <a href="http://www.studentlibrary.ru/">http://www.studentlibrary.ru/</a>                                        |   |
| – Образовательная платформа Юпайт – <a href="https://urait.ru/">https://urait.ru/</a>                                                         |   |
| – ЭБС ZNANIUM.com – <a href="https://znanium.com/">https://znanium.com/</a>                                                                   |   |
| – ЭБС IPRbooks – <a href="http://www.iprbookshop.ru/">http://www.iprbookshop.ru/</a>                                                          |   |

### **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.

### **15. Информация о разработчиках**

- Александрова Анна Геннадьевна, к.ф.-м.н.
- Галушина Татьяна Юрьевна, к.ф.-м.н.
- Бордовицына Татьяна валентиновна, д.ф.-м.н.

