

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Введение в экзопланеты
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра космической физики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: В.И. Шематович, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры космической физики 04.06.2020

## Аннотация

Наше понимание экзопланет достигло впечатляющего успеха в последнее время. С помощью спектроскопических методов для транзитов экзопланет, реализованных на имеющихся космических и наземных наблюдательных инструментах, получен большой объем наблюдательных данных о составе и структуре атмосфер экзопланет. В самих планетных системах отдельные планеты могут иметь твердые, газовые и, в некоторых случаях, жидкие оболочки. Их характеристики варьируются от планет земного типа через суб-нептуны и нептуны до газовых гигантов, причем каждый тип экзопланет занимает большую часть орбитальных расстояний, покрываемых современными методами наблюдения. По мере непрерывного прогресса в методах обнаружения и характеристики экзопланет накапливаются статистические данные, показывающие положение (по-видимому, вполне обычное) нашей Солнечной системы среди экзопланетных систем.

С текущей и планируемой деятельностью космических и наземных телескопов в поисках экзопланет малой массы в обитаемых зонах ближайших звезд (TESS, PLATO, WSO-UV, ESPRESSO и др.), наступает новая эра для продвижения знаний об эволюции и обитаемости планет, которые находятся рядом с нами. Исследование образования и эволюции первичных и вторичных атмосфер и потенциальной обитаемости экзопланет земного типа - суб-, экзо- и супер-земель, - и нового класса не имеющих аналогов в Солнечной системе экзопланет - суб-нептунов и планет-океанов, - имеет первостепенное значение для ряда современных естественнонаучных проблем, важнейшими из которых являются космогония Солнечной системы и происхождение жизни на Земле. Хотя открыто около 4000 экзопланет, мы все еще не можем установить, пригодна ли какая-либо экзопланета земного типа для жизни. Решение этих проблем требует знания эволюции атмосферы таких планет в течении их жизни.

В курсе лекций "Введение в экзопланеты" будут представлены основные этапы открытий и исследований планет у других звезд. Основное внимание будет уделено актуальным наблюдательным и теоретическим исследованиям экзопланет, как одного из активно развиваемых направлений вычислительной астрофизики и космической физики.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Курс «Введение в экзопланеты» входит в цикл образовательно-профессиональных дисциплин основной образовательной программы подготовки научно-педагогических кадров высшей квалификации в магистратуре по направлению 03.04.01 - Прикладные математика и физика

### Задачи дисциплины

Получение базовых знаний, необходимых студенту для проведения научных исследований в рамках своей магистерской работы.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений

ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

основы физики космоса и вычислительной астрофизики

уметь:

выработать представление об актуальных проблемах науки и техники в области физики космоса, быть способным на научном языке формулировать профессиональные задачи

владеть:

системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Протопланетные диски	2			2
2	Образование экзопланет	2			2
3	Методы наблюдения экзопланет	2			2
4	Методы наблюдения атмосфер экзопланет	2			2
5	Солнечная система - планеты	2			2
6	Солнечная система - малые тела	2			2
7	Статистика экзопланет и их характеристика	2			2
8	Архитектура планетных систем	2			2
9	Первичные атмосферы экзопланет	2			2
10	Вторичные атмосферы экзопланет	2			2
11	Зоны потенциальной обитаемости	2			2
12	Атмосферные биомаркеры	2			2
13	Надтепловые частицы в планетных атмосферах	2			2
14	Кинетический метод Монте-Карло для исследования планетных атмосфер	2			2
15	Перспективы исследования экзопланет	2			2
Итого часов		30			30

Подготовка к экзамену	30 час.
Общая трудоёмкость	90 час., 2 зач.ед.

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Протопланетные диски

Протозвездные облака. Гравитационные неустойчивости и коллапс. Механизмы отвода углового момента. Структура и состав протопланетного диска.

##### 2. Образование экзопланет

Области формирования планет. Резонансы. Модели формирования планет. Миграция планет. Основные типы планет.

##### 3. Методы наблюдения экзопланет

Транзитный метод. Метод лучевых скоростей. Метод микролинзирования. Метод прямого наблюдения

##### 4. Методы наблюдения атмосфер экзопланет

Спектры поглощения в атмосферах экзопланет. Возможности наблюдения радиоизлучения. Основные ограничения наблюдательных методов, эффекты наблюдательной селекции. Основные наблюдательные миссии, нацеленные на открытие и исследование атмосфер экзопланет

##### 5. Солнечная система - планеты

Солнечная система и ее архитектура. Гелиосфера. Основные характеристики планет (масса, плотность, характер вращения, свойства атмосферы, магнитные поля, условия на поверхности). Наземные и космические методы исследования тел Солнечной системы.

##### 6. Солнечная система - малые тела

Малые тела Солнечной системы. Спутники и кольца планет. Астероиды и пояса астероидов. Кометы. Миры с океанами. Метеорное вещество.

##### 7. Статистика экзопланет и их характеристика

Статистические исследования экзопланет необходимы для верификации моделей образования планет и получения оценок количества планет определенных типов в Галактике (например, планет земного типа в обитаемой зоне). Кроме того, вариации распространенности планет во всем пространстве параметров могут указывать на астрофизические явления, значимые в эволюции планетных систем. Анализ распределения экзопланет по радиусам, полученного на основе данных «Кеплера», привел к обнаружению т.н. «зазора Фултона» – примерно двукратного дефицита планет с радиусами 1.7-1.9 радиусов Земли, маркирующего границу между суперземлями (планетами преимущественно железокремнистого состава) и мини-нептунами (планетами, окруженными протяженными водородно-гелиевыми атмосферами, чья масса может достигать нескольких процентов от полной массы планеты).

##### 8. Архитектура планетных систем

Планетные системы у других звезд. Компактные планетные системы. Планетные системы с горячими юпитерами и нептонами. Сравнение с архитектурой Солнечной системы.

#### 9. Первичные атмосферы экзопланет

Формирование первичных и вторичных атмосфер экзопланет. Структура и динамика атмосфер. Атмосферы газовых и ледяных гигантов, суб-нептунов и планет-океанов, каменистых планет. Атмосферы супер-, экзо- и суб-земель.

#### 10. Вторичные атмосферы экзопланет

Взаимодействие атмосфер со звездным ветром. Строение ионосферы, магнитосферы, взаимодействие магнитосферы со звездным ветром. Полярные сияния. Потеря атмосферы и переход от первичных ко вторичным атмосферам. Типы протяженных оболочек горячих юпитеров.

#### 11. Зоны потенциальной обитаемости

Основные факторы, влияющие на обитаемость экзопланет. Влияние ранних стадий эволюции родительской звезды на положение зон обитаемости. Магнитное поле и зоны обитаемости. Возможные расширения потенциальных зон обитания.

#### 12. Атмосферные биомаркеры

Биомаркеры и возможности их наблюдений. Атмосферные биомаркеры. Ложно положительные и отрицательные биомаркеры. N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> атмосферы.

#### 13. Надтепловые частицы в планетных атмосферах

Структура планетной атмосферы. Описание атмосферы на микро- и макро-скопических уровнях. Кинетическое уравнение Больцмана и газодинамические уравнения для описания состояния атмосферы. Тепловые и надтепловые частицы. Фотохимические и плазменные источники надтепловых частиц. Роль надтепловых частиц в атмосферной химии и энергетике, в диссипации атмосферы.

#### 14. Кинетический метод Монте-Карло для исследования планетных атмосфер

Кинетика надтепловых частиц. Микро- и макроскопические уровни описания и математические модели. Кинетический метод Монте-Карло (КММК). Численные модели для исследования кинетики и динамики надтепловых частиц в планетных атмосферах. Приложения КММК для задач аэрономии и астрохимии.

#### 15. Перспективы исследования экзопланет

Текущие и будущие наземные и космические проекты исследования экзопланет. Наблюдательная программа внеатмосферной обсерватории «Спектр-УФ» по экзопланетам. Комплекс наземных исследований экзопланет на российских телескопах и инструментах.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Турбулентность и самоорганизация. Проблемы моделирования космических и природных сред, [монография] / А. В. Колесниченко, М. Я. Маров. — Москва, Лаборатория знаний, 2020.— URL: <http://books.mipt.ru/book/301469> (дата обращения: 10.03.2021). - Полный текст (Режим доступа : из сети МФТИ / Удаленный доступ)

#### Дополнительная литература

1. В.И. Шематович, М.Я. Маров. Диссипация планетных атмосфер: физические процессы и численные модели. УФН, 2018, т. 188, №3, 233-265.

### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

ИНАСАН, Лаборатория "Исследование звезд с экзопланетами": [lsse.inasan.ru](http://lsse.inasan.ru)

### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Skype, Zoom

### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

Литература для самостоятельного изучения:

1. Chamberlain J.W., Hunt D. Theory of planetary atmospheres. An introduction to their physics and chemistry. New York: Acad. Press, 1987. 455 p.
2. Marov, M.Ya., Shematovich, V.I., Bisikalo, D.V. and Gerard J.-C. Nonequilibrium processes in the planetary and cometary atmospheres: Theory and Applications. 1997, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 293 pp.
3. Bisikalo, D., Kaygorodov, P., & Shematovich, V. (2019). Exoplanets: atmospheres of hot jupiters. In Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science. Oxford University Press. doi: <http://dx.doi.org/10.1093/acrefore/9780190647926.013.103>
4. В.И. Шематович. Надтепловые частицы в астрохимии. Успехи химии, 2019, т. 88, №10, 1013-1045.

5. Michael Perryman. The Exoplanet Handbook. Cambridge University Press, 2011
6. Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments, Ed. by: Lammer, Helmut, Khodachenko, Maxim. Astrophysics and Space Science Library. Springer International Publishing, 2014.
7. From Disks to Planets: The Making of Planets and Their Early Atmospheres. Eds. M. Blanc, G.J. Herczeg, V. Sterken, H. Lammer, W. Benz, S. Udry, R. Rodrigo, M. Falanga. Space Science Series of ISSI. Springer, 2018.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра космической физики
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	В.И. Шематович, д-р физ.-мат. наук



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в экзопланеты» обучающийся должен:

### знать:

основы физики космоса и вычислительной астрофизики

### уметь:

выработать представление об актуальных проблемах науки и техники в области физики космоса, быть способным на научном языке формулировать профессиональные задачи

### владеть:

системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Методы наблюдений экзопланет, Классы экзопланет, Атмосферы экзопланет, Архитектура планетных систем

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов

1. Структура и состав протопланетного диска
2. Основные типы планет и их атмосфер
3. Методы наблюдения экзопланет и их атмосфер
4. Образование первичных атмосфер экзопланет

5. Образование вторичных атмосфер экзопланет
6. Взаимодействие атмосфер со звездным ветром
7. Архитектура планетных систем
8. Солнечная система и гелиосфера

#### Примеры контрольных заданий

1. Потеря атмосферы и переход от первичных ко вторичным атмосферам
2. Типы протяженных оболочек горячих юпитеров
3. Зоны обитаемости экзопланет и атмосферные биомаркеры
4. Тепловые и надтепловые частицы и их фотохимические и плазменные источники
5. Кинетическое уравнение Больцмана и газодинамические уравнения для описания состояния атмосферы
6. Кинетика надтепловых частиц
7. Кинетический метод Монте-Карло (КММК)
8. Диссипация планетных атмосфер: физические процессы и численные модели

#### Примеры экзаменационных билетов

##### Билет 1.

1. Структура и состав протопланетного диска
2. Потеря атмосферы и переход от первичных ко вторичным атмосферам

##### Билет 2.

1. Типы протяженных оболочек горячих юпитеров
2. Зоны обитаемости экзопланет

##### Билет 3.

1. Методы наблюдения экзопланет и их атмосфер
2. Кинетическое уравнение Больцмана и газодинамические уравнения для описания состояния атмосферы

##### Билет 4.

1. Основные типы планет и их атмосфер
2. Атмосферные биомаркеры

##### Билет 5.

1. Солнечная система: состав и структура
2. Образование первичных атмосфер экзопланет

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении зачёта и экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Вопрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.