

**Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
Российской академии наук» (ИПФ РАН)**

УТВЕРЖДАЮ:

Зам. директора по научной работе

\_\_\_\_\_ М.Ю. Глявин

\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Рабочая программа дисциплины**

**Геофизическая электродинамика**

Уровень высшего образования  
Подготовка кадров высшей квалификации

Направление подготовки / специальность  
03.06.01 Физика и астрономия

Направленность образовательной программы  
01.04.08 «Физика плазмы»

Квалификация (степень)  
Исследователь. Преподаватель-исследователь.

Форма обучения  
очная

Нижний Новгород

20\_\_

## 1. Место и цели дисциплины в структуре образовательной программы (ОП)

Дисциплина «Геофизическая электродинамика» относится к числу профильных дисциплин вариативной части образовательной программы, является дисциплиной по выбору аспиранта, преподается на втором году обучения в четвертом семестре.

**Целями освоения дисциплины являются:**

- формирование современного представления об основных физических явлениях в околоземном космическом пространстве и методах их описания;
- ознакомление с практическими применениями физических наук в этой области;
- формирование профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» и направленностью подготовки 01.04.08 «Физика плазмы».

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Таблица 1:

Планируемые результаты обучения по дисциплине

Код и этап формируемой компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине
<b>ПК-2</b> <i>способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта</i> (этап освоения – <b>базовый</b> )	<i>З1 (ПК-1) Знать основные направления современных научных исследований в области физики околоземного космического пространства в контексте характеристик современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта</i> <i>У1 (ПК-1) Уметь самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики околоземного космического пространства и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.</i> <i>В1 (ПК-1) Владеть навыками проведения научных исследований в области физики околоземного космического пространства с учетом характеристик и возможностей современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.</i>
<b>ПК-3</b> <i>способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)</i> (этап освоения – <b>базовый</b> )	<i>У1 (ПК-2) Уметь свободно применять полученные знания по физике физики околоземного космического пространства для решения научно-инновационных задач, связанных с влиянием солнечного ветра на структуру магнитосферы, с ускорением частиц в магнитосфере, с неустойчивостями плазмы и их ролью в динамике магнитосферы.</i> <i>В1 (ПК-2) Владеть методами описания плазмы в околоземном космическом пространстве.</i>

### 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 38 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (36 часов занятия лекционного типа, в т.ч. мероприятия текущего контроля успеваемости, 2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 70 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 2:

Структура дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы			
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Всего	
Тема 1 Структура околоземного космического пространства. Магнитосфера Земли. Методы описания	13	4		4	9
Тема 2 Геомагнитное поле и заряженные частицы в околоземном пространстве	13	5		5	8
Тема 3. Магнитосферная конвекция	13	4		4	9
Тема 4. Магнитосферные циклотронные мазеры	13	5		5	8
Тема 5. Квазилинейная теория космических циклотронных мазеров	14	5		5	9
Тема 6. Нелинейная теория взаимодействия электронов с электромагнитной волной на циклотронном резонансе	13	4		4	9
Тема 7. Применения теории магнитосферных циклотронных мазеров	14	5		5	9
Тема 8. Альфвеновские волны и турбулентный альфвеновский погранслой в ионосфере	13	4		4	9
в т.ч. текущий контроль			4		
Промежуточная аттестация -зачет				2	
Итого				<b>108</b>	

#### Содержание разделов дисциплины

##### Структура околоземного космического пространства. МГД описание

Структура и параметры околоземного космического пространства. Основные уравнения магнитной гидродинамики. Теорема вмороженности магнитных силовых линий в плазму и ее следствия. Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой. Генерация электрического поля внутри магнитосферы.

### **Геомагнитное поле и заряженные частицы в околоземном пространстве.**

Структура геомагнитного поля. Движение заряженных частиц в неоднородном магнитном и электрическом полях. Инварианты движения. Геомагнитная ловушка и конус потерь. Радиационные пояса Земли.

### **Магнитосферная конвекция.**

Магнитосферная конвекция как следствие электрического дрейфа магнитосферной плазмы. Формирование плазмосферы. Ускорение заряженных частиц в процессе магнитосферной конвекции. Формирование овала полярных сияний.

### **Альфвеновские волны и турбулентный альвеновский погранслои.**

Альфвеновские волны. Импедансное граничное условие для МГД волн на нижней кромке ионосферы. Ионосферный альфвеновский резонатор. Возбуждение альфвеновских вихрей магнитосферной конвекцией. Аномальная диссипация альфвеновских вихрей. «Убегающие» электроны.

### **Магнитосферные циклотронные мазеры.**

Атрибуты магнитосферных циклотронных мазеров. Циклотронный резонанс и циклотронная неустойчивость. Особенности циклотронного взаимодействия волн и частиц в магнитосфере.

### **Нелинейная теория взаимодействия электронов с электромагнитной волной на циклотронном резонансе.**

Взаимодействие электронов с монохроматической электромагнитной волной на циклотронном резонансе в однородном магнитном поле. Интегралы движения и фазовая плоскость. Особенности циклотронного взаимодействия с электромагнитной волной в неоднородном магнитном поле. Эффекты ускорения электронов, захваченных полем волны. Магнитосферная лампа обратной волны.

### **Квазилинейная теория космических циклотронных мазеров.**

Квазилинейное описание циклотронной неустойчивости. Упрощение квазилинейной системы уравнений в магнитосферном циклотронном мазере. Усреднение по пространственной переменной. Стационарная генерация волн. Балансное приближение. Релаксационные колебания. Влияние внешних периодических воздействий. Автоколебательные режимы работы циклотронных мазеров.

### **Применения теории магнитосферных циклотронных мазеров.**

Циклотронный мазер как регулятор интенсивности радиационных поясов Земли. Шумовые электромагнитные низкочастотные излучения в магнитосфере Земли. Генерация дискретных излучений. Триггерные сигналы.

## **4. Образовательные технологии**

Основными видами образовательных технологий дисциплины «Геофизическая электродинамика» являются занятия лекционного типа с применением технологий интерактивного обучения (презентаций), проблемный метод изложения материала, диалоговая форма проведения занятий и самостоятельная работа аспиранта.

## **5. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся**

Используются следующие виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки ИПФ РАН, в компьютерном классе с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе аудиторных занятий по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические посо-

бия, доступные ресурсы в Интернет по тематике курса, а также конспекты и презентации лекций.

## **6. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине**

### **6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), и уровня их сформированности**

Описание показателей и критериев оценивания компетенций приведены в приложении 1.

### **6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине. Описание шкал оценивания**

Для оценивания сформированности компетенций используется промежуточная аттестация в форме зачета. Зачет состоит из индивидуального собеседования и решения практических контрольных заданий. Критерии оценок выполнения задания:

Зачтено	В целом удовлетворительная подготовка, возможно с заметными, но не грубыми ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы собеседования, возможно с небольшими неточностями; допускаются негрубые ошибки при ответах на дополнительные вопросы. Полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей, возможно с не всегда полной обоснованностью выводов.
Не зачтено	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы как на теоретические вопросы, так и на наводящие и дополнительные вопросы преподавателя, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки.

### **6.3. Контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций.**

**Вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:**

Для оценки сформированности профессиональных компетенций ПК-2, ПК-3:

1. Магнитогидродинамическое описание плазмы.
2. Теорема вмороженности плазмы в магнитное поле.
3. Магнитное число Рейнольдса. Уравнение диффузии магнитного поля.
4. Дрейфовое описание движения заряженных частиц в неоднородном магнитном поле. Магнитный и электрический дрейф.
5. Адиабатические инварианты движения заряженных частиц в геомагнитном поле.
6. Геомагнитная ловушка и конус потерь.
7. Магнитосферная конвекция. Ускорение заряженных частиц в процессе конвекции.
8. Плазмосфера.
9. Овал полярных сияний.
10. Альфвеновские волны и альфвеновские вихри.
11. Импедансное граничное условие для МГД волн на ионосферной подложке.
12. Ионосферный альфвеновский резонатор.
13. Механизм возбуждения альфвеновских вихрей в ионосфере.
14. Явление убегающих электронов.
15. Свистовые волны.
16. Циклотронный резонанс электронов со свистовыми волнами.

17. Движение электронов, находящихся в циклотронном резонансе с монохроматической волной (вистлером). Фазовая плоскость и частота осцилляций электрона в потенциале волны.
18. То же, что и в п.17, в неоднородном магнитном поле; эффект ускорения электронов.
19. Критерий и инкремент циклотронной неустойчивости в случае двухтемпературной функции распределения электронов.
20. Квазилинейная теория магнитосферного циклотронного мазера.
21. Эволюция функции распределения электронов при развитии циклотронной неустойчивости в геомагнитной ловушке.
22. Двухуровневое приближение в теории циклотронной неустойчивости. Релаксационные колебания.
23. Магнитосферная лампа обратной волны.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

- 1) В. Ю. Трахтенгерц, М. Дж. Райкрофт, Свистовые и альфвеновские циклотронные мазеры в космосе, М.:Физматлит, 2011. – 3экз.
- 2) Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю. “Альфвеновские мазеры”. - ИПФ АН СССР, Горький, 1986. – 3 экз.
- 3) Мареев Е. А., Чугунов Ю. В. “Антенны в плазме”. - ИПФ РАН, Н. Новгород, 1991. – 3 экз.

б) дополнительная литература:

- 1) Железняков В.В. “Радиоизлучение Солнца и планет”. – М.: Наука, 1964. – 2 экз.
- 2) К. Лонгмайр, Физика плазмы - М.: Атомиздат, 1966. - 341 с -- 1 экз.
- 3) Плазменная гелиогеофизика (в 2-х т.) / Ред. Л. М. Зеленый. М.: Физматлит, 2008. – 2 экз.
- 4) Обратные задачи и методы их решения. Приложения к геофизике/ А.Г. Ягола, Ван Янфей, И.Э. Степанова, В.Н. Титаренко - М. : Лаборатория знаний, . – 1 экз.
- 5) Сборник научных трудов «Тепловые нелинейные явления в плазме», ред. В.Ю. Трахтенгерц, 1979 [Электронный ресурс – Виртуальная библиотека ИПФ РАН] <http://www.iapras.ru/biblio/img/tepl.pdf>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

- 1) А. Г. Демехов. Страничка курса "Геофизическая электродинамика" (<http://aurora.appl.sci-nnov.ru/home/andrei/teach/ged.html> )
- 2) А. Г. Демехов. Задачи по курсу "Геофизическая электродинамика" (<http://www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/2010/66.pdf> )
- 3) А. Demekhov, Cyclotron resonant interactions in space plasmas: generation of radiation and particle acceleration (<https://astrosoma.wikispaces.com/2014+Lecture+plan+Demikhov>), lectures given at [School of Modern Astrophysics 2014](#)
- 4) Иллюстрации: [Схема земной магнитосферы \(http://galspace.spb.ru/index19.html\)](http://galspace.spb.ru/index19.html)
- 5) Курсы лекций
  - Основы физики космической плазмы (СПбГУ, [http://geo.phys.spbu.ru/Education\\_rus/EDUCATION\\_BACHELOR/SolarPhysics2.html](http://geo.phys.spbu.ru/Education_rus/EDUCATION_BACHELOR/SolarPhysics2.html) )
  - Основы физики солнца (СПбГУ, [http://geo.phys.spbu.ru/Education\\_rus/EDUCATION\\_BACHELOR/SolarPhysics3.html](http://geo.phys.spbu.ru/Education_rus/EDUCATION_BACHELOR/SolarPhysics3.html) )

- Физика магнитосферы (СПбГУ, [http://geo.phys.spbu.ru/Education\\_rus/EDUCATION\\_MASTER/MagSpher\\_PhysMagnitSpher\\_Sem.html](http://geo.phys.spbu.ru/Education_rus/EDUCATION_MASTER/MagSpher_PhysMagnitSpher_Sem.html) )
- Магнитосферные возмущения (СПбГУ, [http://geo.phys.spbu.ru/Education\\_rus/EDUCATION\\_MASTER/MagSpher\\_MagnVozm\\_Ser.html](http://geo.phys.spbu.ru/Education_rus/EDUCATION_MASTER/MagSpher_MagnVozm_Ser.html) )
- Физика высокоширотной ионосферы и полярные сияния (СПбГУ, [http://geo.phys.spbu.ru/Education\\_rus/EDUCATION\\_MASTER/MagSpher\\_Ionosph\\_Kot.html](http://geo.phys.spbu.ru/Education_rus/EDUCATION_MASTER/MagSpher_Ionosph_Kot.html) )

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

- Специальные помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет";
- Лицензионное программное обеспечение (*Windows, Microsoft Office*); Python 3.5.1 – открытое бесплатное ПО; PascalABC.NET – открытое бесплатное ПО; Visual Studio Code - открытое бесплатное ПО; Adobe Acrobat Reader DC – открытое бесплатное ПО;
- Обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются (при необходимости) электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, направленность 01.04.08 Физика плазмы.

Автор \_\_\_\_\_ А.Г. Демехов

Ответственный за направление подготовки \_\_\_\_\_ Вл.В. Кочаровский

Рецензент:

Зав.сектором нелинейной и квантовой оптики  
конденсированных и плазмоподобных сред

\_\_\_\_\_ М.Д. Токман,  
д.ф.м.н., профессор

Программа принята на заседании Ученого совета Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН, протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь ОФПиЭБМ \_\_\_\_\_ О.С. Моченева

Программа принята на заседании Ученого совета отделения геофизических исследований и Центра гидроакустики ИПФ РАН, протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь ОГИиЦГ \_\_\_\_\_ М.В. Шаталина

Программа принята на заседании Ученого совета отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН, протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь ОНДиО \_\_\_\_\_ А.В. Коржиманов

**Карты компетенций, в формировании которых участвует дисциплина**

**ПК-2:** Способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания результатов обучения	
	Зачтено	Не зачтено
<u>Знания:</u> Знать основные направления современных научных исследований в области физики околоземного космического пространства в контексте характеристик современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта	Успешная демонстрация знаний по базовым разделам дисциплины	Отсутствие знаний или фрагментарные знания без положительного результата применения
<u>Умения:</u> Уметь самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики околоземного космического пространства и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта	Успешная демонстрация умений по базовым разделам дисциплины	Отсутствие умений или фрагментарное присутствие умений без положительного результата
<u>Навыки:</u> Владеть навыками проведения научных исследований в области физики околоземного космического пространства с учетом характеристик и возможностей современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта	Успешная демонстрация навыков решения задач на базе полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Отсутствие навыков или фрагментарные навыки без положительного результата применения
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	50 – 100%	0 – 50 %

**ПК-3:** Способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)

Индикаторы компетенций	Критерии оценивания результатов обучения	
	Зачтено	Не зачтено
<u>Умения:</u> Уметь свободно применять полученные знания по физике физики околоземного космического пространства для решения научно-инновационных задач, связанных с влиянием солнечного ветра на структуру магнитосферы, с ускорением частиц в магнитосфере, с неустойчивостями плазмы и их ролью в динамике магнитосферы	Успешная демонстрация умений по базовым разделам дисциплины	Отсутствие умений или фрагментарное присутствие умений без положительного результата
<u>Навыки:</u> Владеть методами описания плазмы в околоземном космическом пространстве.	Успешная демонстрация навыков решения задач на базе полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Отсутствие навыков или фрагментарные навыки без положительного результата применения
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	50 – 100%	0 – 50 %