

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЗФ СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИСЗФ СО РАН

чл.-корр. РАН _____ А.В. Медведев

« 20 » апреля 2026 г.

Рабочая программа дисциплины

2.1.6 Физика ионосферы

Научная специальность 1.3.4. Радиофизика

Иркутск 2026

РАБОЧУЮ ПРОГРАММУ разработал доктор физико-математических наук	Тащилин А.В.
---	--------------

1. Место и роль дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Дисциплина «Физика ионосферы» входит в образовательный компонент основной профессиональной образовательной программы по научной специальности 1.3.4. Радиофизика.

Дисциплина является обязательной для обучающихся в аспирантуре по научной специальности 1.3.4. Радиофизика.

Знания и умения, приобретаемые аспирантами после изучения дисциплины, будут использоваться для решения научных задач, и направлены на подготовку к сдаче кандидатского экзамена и к дальнейшей научной работе.

2. Цели и задачи дисциплины (модуля)

Целью дисциплины «Физика ионосферы» является получение фундаментальных знаний о верхней атмосфере Земли и ее основной части – ионосфере – и о возможности их использования в процессе дальнейшего обучения, при прохождении практик, написания научных работ, в своей научной и педагогической деятельности.

Задачами дисциплины «Физика ионосферы» является:

- Получение и освоение современных знаний о структуре околоземного космического пространства, о физических процессах, контролирующих состояние ионосферы и атмосферы Земли и их изменчивость.
- Ознакомление с методами математического моделирования процессов в верхней атмосфере и ионосфере Земли.
- Привитие навыков выполнения инженерных расчетов на компьютере основных характеристик нейтральной атмосферы, ионосферы и плазмосферы.

3. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля)

Знать:

- общие сведения о строении верхней атмосферы Земли, методах наблюдений за ее состоянием и о значении геофизических исследований в проблеме солнечно-земных связей;
- основные характеристики физических процессов, контролирующих состояние нейтральной атмосферы, ионосферы и плазмосферы;
- общие сведения об ионосферных слоях, механизмах их образования и пространственно-временных вариациях;
- основные теоретические подходы к описанию ионосферных процессов и основы математического моделирования ионосферы, плазмосферы и верхней атмосферы.

Уметь:

- количественно оценивать основные характеристики верхней атмосферы и ионосферной плазмы;
- выполнять простейшую обработку данных наблюдений;
- использовать математические знания для решения задач физики верхней атмосферы, ионосферы, плазмосферы.

Владеть:

- основными математическими методами решения физических задач;
- методами обработки экспериментальных данных;
- навыками работы с основными измерительными приборами и пакетами численной обработки экспериментальных данных.

4. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы/ 108 часов.

Вид учебной работы	Всего часов / зачетных единиц
--------------------	----------------------------------

Аудиторные занятия (всего)	36/1
В том числе:	
Лекции	36/1
Семинары	
Самостоятельная работа (всего)	72/2
Вид промежуточной аттестации (зачет, экзамен)	зачет
Контактная работа (всего)	36/1
Общая трудоёмкость (часы/зачетные единицы)	108/3

5. Содержание дисциплины (модуля)

5.1. Содержание разделов и темы дисциплины (модуля)

Раздел 1. Структура верхней атмосферы

Тема 1. Общее строение верхней атмосферы. Термосфера и ионосфера. Энергетический баланс в термосфере. Турбопауза. Гидростатическое равновесие. Убегание частиц из атмосферы.

Тема 2. Слоистая структура ионосферы. Региональные и временные (суточные, сезонные, гелиоциклические) вариации основных параметров ионосферных слоев. Ионосферные аномалии.

Раздел 2. Основные физические процессы в ионосфере

Тема 1. Ионизирующее излучение Солнца. Ионизация нейтральной атмосферы. Ионизационная функция и теория простого слоя Чепмена. Фотоэлектроны.

Тема 2. Уравнение баланса ионизации. Фотохимическое равновесие. Типы химических реакций в ионосфере.

Тема 3. Диффузия в ионосфере. Амбиполярное приближение.

Раздел 3. Образование ионосферных слоев

Тема 1. Нижняя ионосфера. Формирование слоев D, E, F1. Образование слоя F2 в среднеширотной ионосфере.

Тема 2. Тепловая структура среднеширотной ионосферы.

Раздел 4. Взаимодействие ионосферы с плазмосферой

Тема 1. Внешняя ионосфера. Роль конфигурации геомагнитного поля в физике ионосферы. Концепция замкнутых и разомкнутых геомагнитных силовых линий.

Тема 2. Перенос плазмы между геомагнитно сопряженными ионосферами. Плазмосферный резервуар. Заполнение плазмосферного резервуара ионосферной плазмой. Полярный ветер.

Раздел 5. Электродинамика ионосферы

Тема 1. Проводимость ионосферной плазмы. Электродинамические дрейфы в ионосфере. Принципы динамо теории и генерация токов в ионосфере.

Тема 2. Особенности ионосферных процессов в высоких и экваториальных широтах. Геофизическое районирование

Раздел 6. Нерегулярные явления в ионосфере

Тема 1. Ионосферные возмущения: классификация, морфология, механизмы.

Тема 2. Реакция ионосферы на солнечные вспышки и магнитные бури.

5.2. Разделы дисциплины (модуля) и виды занятий

№	Раздел	Всего часов	Аудиторные занятия		СРС	Форма контроля
			Лекции	Практические занятия		
1	Структура верхней атмосферы	16	4		12	зачет
2	Основные физические процессы в ионосфере	18	8		10	зачет
3	Образование ионосферных слоев	24	8		16	зачет

4	Взаимодействие ионосферы с плазмосферой	16	4		12	зачет
5	Электродинамика ионосферы	16	4		12	зачет
6	Нерегулярные явления в ионосфере	18	8		10	зачет
Итого (часы)		108	36		72	
Итого (з.е.)		3	1		2	

5.3. Разделы и темы дисциплины (модуля) и междисциплинарные связи

№ п/п	Наименование обеспечиваемых (последующих) дисциплин и практик	№ № разделов и/или тем данной дисциплины, необходимых для изучения обеспечиваемых (последующих) дисциплин
1	Исследовательская практика	Разделы 1-6

5.4. Перечень лекционных занятий

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины (модуля)	Наименование используемых технологий	Трудоемкость (часы)	Оценочные средства
1.	Структура верхней атмосферы	лекция	4	устный опрос
2.	Основные физические процессы в ионосфере	лекция	8	устный опрос
3.	Образование ионосферных слоев	лекция	8	устный опрос
4.	Взаимодействие ионосферы с плазмосферой	лекция	4	устный опрос
5.	Электродинамика ионосферы	лекция	4	устный опрос
6.	Нерегулярные явления в ионосфере	лекция	8	устный опрос

5.5. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

Данный вид занятий не предусмотрен

5.6. Перечень и содержание самостоятельной работы

Раздел	Тема	Вид самостоятельной работы	Рекомендуемая литература	Всего часов
1	Структура верхней атмосферы	Конспектирование и выделение главных тезисов по теме, формулирование проблемных вопросов по теме.	основная литература: 1,2,3,8,10 дополнительная литература: 2,6	12
2	Основные физические процессы в ионосфере	Конспектирование и выделение главных тезисов по теме, формулирование проблемных вопросов по теме.	основная литература: 1,2,3,6,7,8,10 дополнительная литература: 1,2,5,6,7	10
3	Образование ионосферных слоев	Конспектирование и выделение главных тезисов по теме, формулирование проблемных вопросов по теме.	основная литература: 1,2,3,6,7,8,10 дополнительная литература: 1,2,3,5,6,7	16
4	Взаимодействие ионосферы с плазмосферой	Конспектирование и выделение главных тезисов по теме, формулирование проблемных вопросов по теме.	основная литература: 3,6,10 дополнительная литература: 2,3,5	12
5	Электродинамика ионосферы	Конспектирование и выделение главных тезисов по теме, формулирование проблемных	основная литература: 1,3,8,10 дополнительная	12

		вопросов по теме.	литература: 2,4,5	
6	Нерегулярные явления в ионосфере	Конспектирование и выделение главных тезисов по теме, формулирование проблемных вопросов по теме.	основная литература: 1,3,5,8,10 дополнительная литература: 1,2,4,6	10

Методические указания по организации самостоятельной работы

Каждый вид самостоятельной работы направлен на закрепление и углубление знаний, полученных во время аудиторных занятий.

1) Работа с конспектами лекций

Аспирант повторяет содержание лекции, используя материалы конспекта, в случае необходимости дополняет их информацией из рекомендуемой и дополнительной литературы.

2) Работа с литературой

Аспирант осваивает материал, предназначенный для самостоятельного изучения, используя рекомендуемую и дополнительную литературу, составляет подробный конспект темы, анализирует, формулирует проблемные вопросы по теме

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

6.1. Основная литература

№	Автор, название, место издания, издательство, год издания учебной и учебно-методической литературы	Количество экземпляров
1	Солнечно-земная физика : ч.1 / С. И. Акасофу, С. Чепмен ; Пер. с англ. под ред. Г.М. Никольского . - М. : Мир, 1974. - 384 с	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
2	Бауэр З. Физика планетных ионосфер. М.: Мир, 1976.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
3	Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
4	Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Химия и физика стратосферы и мезосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1987.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
5	Жеребцов Г.А., Мизун Ю.Г., Мингалев В.С. Физические процессы в полярной ионосфере. М.: Наука, 1988.	3
6	Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
7	Ратклифф Д. Введение в физику ионосферы и магнитосферы. М.: Мир, 1975.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
8	Ришбет Г., Гарриот О. Введение в физику ионосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
9	Уиттен Р., Поппов И. Основы аэрономии. Л.: Гидрометеиздат, 1977.	2
10	Харгривс Дж.К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Л.: Гидрометеиздат, 1982.	4

6.2. Дополнительная литература

№	Автор, название, место издания, издательство, год издания учебной и учебно-методической литературы	Количество экземпляров
1	Маров М.Я., Колесниченко А.В. Введение в планетную астрономию. М., Наука, 1987.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
2	Brekke A. Physics of the Upper Polar Atmosphere. 2th ed. Chichester: Springer Praxis, 2013.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
3	Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. The High - Latitude Ionosphere and its Effects on Radio Propagation [Text] / R. D. Hunsucker, J. K. Hargreaves. - Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2003. - 639 p.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
4	Kelley M.C. The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics [Electronic resource] / M. C. Kelley. - San Diego : Acad. Press, 1989. - 485 p.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
5	Schunk R.W., Nagy A.F. Ionospheres: Physics, Plasma physics, and Chemistry. 2th ed. Cambridge University Press, 2009.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
6	Prolss G. Physics of the earth's space environment. Springer-Verlag Berlin, 2004.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
7	Популярная астрономия / А.Д. Данилов. Л. Гидрометеиздат, 1978.	5

6.3. Профессиональные базы данных, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине:

- База данных наблюдений отдела физики околоземного космического пространства ИСЗФ СО РАН (<http://dep1.iszf.irk.ru/>)
- Архив наблюдений геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (<http://atmos.iszf.irk.ru/>)
- Научная база данных Scopus (<https://www.scopus.com>)
- Научные данные (материалы) издательства Cambridge University Press (<http://www.cambridge.org>)

6.4. Информационные, информационно-справочные системы, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине:

- Информационно-справочная информация в библиотеке ИСЗФ СО РАН <http://irbis.iszf.irk.ru>
- Государственная публичная научно-техническая библиотека России <http://www.gpntb.ru/>
- Журналы Американского физического общества <http://publish.aps.org/>
- научная электронная библиотека + Российский Индекс Научного Цитирования <https://elibrary.ru>
- Международный каталог и поисковая система по публикациям в области астрофизики http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html
- Международная система индексирования публикаций Web of Science

<http://webofknowledge.com>

- Научные ресурсы зарубежного издательства Elsevier B.V. – Freedom Collection (<https://www.elsevier.com>)

6.5. Программное обеспечение

Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, в том числе отечественного производства используемое при осуществлении образовательного процесса по дисциплине:

- Операционная система Ubuntu 18.04 (свободно распространяемое ПО)
- Офисный пакет Libre Office (свободно распространяемое ПО)
- 7-Zip (свободно распространяемое ПО)
- Adobe Acrobat Reader DC (свободно распространяемое ПО)
- Mozilla Firefox 1 (свободно распространяемое ПО)
- VLC Mediaplayer (свободно распространяемое ПО)
- K-Lite Codec Pack (свободно распространяемое ПО)
- Операционная система Microsoft Windows 10 Pro
- Сервер видеоконференцсвязи Jitsi Meet

7. Образовательные технологии

В учебном процессе используются как активные, так интерактивные формы проведения занятий.

Интерактивные формы включают в себя:

- Лекции;
- Творческие задания в форме изложения проблемного материала;
- Групповые оценки и взаимооценки: а именно рецензирование аспирантами выступлений друг друга.

Аудиторные занятия проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного обеспечения (ноутбук, проектор). Презентации позволяют качественно иллюстрировать аудиторные занятия схемами, формулами, чертежами, рисунками и структурировать материал занятия. Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что улучшает восприятие материала.

Самостоятельная работа включает в себя:

- формулирование проблемных вопросов в результате самостоятельного изучения темы с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ключевых особенностей;
- конспектирование;

При необходимости, в процессе работы над заданием, аспирант может получить индивидуальную консультацию у преподавателя.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Для обучения имеются специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы.

Специальные помещения укомплектованы специализированной мебелью, техническими средствами обучения, служащими для представления информации большой аудитории, компьютерным оборудованием.

9. Контроль качества освоения программы аспирантуры

Цель контроля – получение информации о результатах обучения и степени их соответствия результатам обучения.

Планируемые результаты освоения дисциплины

Знать:

- современные представления о структуре верхней атмосферы в целом, об основных ее областях, включая термосферу, ионосферу и плазмосферу
- современные методы исследования ионосферы и её поведения в различных геофизических условиях
- основные теоретические представления о строении атмосферы, ионосферы и плазмосферы.

Уметь

- применить современные знания о строении и свойствах верхней атмосферы для понимания геофизических явлений в околоземном космическом пространстве
- проводить качественный анализ ионосферных данных на основе теоретических и эмпирических моделей
- количественно оценить влияние того или иного процесса на общую картину поведения ионосферы.

Владеть

- базовой терминологией для описания характеристик атмосферы, ионосферы и плазмосферы
- методами обработки экспериментальных данных
- навыками работы с научной информацией в области ионосферных исследований
- основными математическими методами решения задач физики верхней атмосферы, ионосферы и плазмосферы

Текущий контроль

Текущий контроль успеваемости аспиранта, т.е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляется на протяжении семестра. Текущий контроль знаний обучающихся организован как устный групповой опрос для повторения и закрепления главных тезисов тем, формулирования и обсуждения проблемных вопросов. После освоения материала раздела учащиеся готовят коллективное сообщение по освещению основных и проблемных вопросов.

Текущая самостоятельная работа аспиранта направлена на углубление и закрепление знаний, и развитие практических умений аспиранта.

Объектами оценивания выступают:

- Учебная дисциплина - активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость занятий;
- Степень усвоения теоретических знаний.

Оценочные средства для оценки текущей успеваемости аспирантов

Характеристика ОС для обеспечения текущего контроля по дисциплине

Раздел/Тема	ОС	Содержание задания
Раздел 1. Структура верхней атмосферы	собеседование	Составить и обсудить на занятии проблемные вопросы по изученному разделу
Раздел 2. Основные физические процессы в ионосфере	собеседование	Составить и обсудить на занятии проблемные вопросы по изученному разделу
Раздел 3. Образование ионосферных слоев	собеседование	Составить и обсудить на занятии проблемные вопросы по изученному разделу.
Раздел 4. Взаимодействие ионосферы с плазмосферой	собеседование	Составить и обсудить на занятии проблемные вопросы по изученному разделу.
Раздел 5. Электродинамика ионосферы	собеседование	Составить и обсудить на занятии проблемные вопросы по изученному разделу.
Раздел 6. Нерегулярные явления в	собеседование	Составить и обсудить на занятии проблемные

ионосфере		вопросы по изученному разделу.
-----------	--	--------------------------------

Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация аспирантов по дисциплине осуществляется по окончанию дисциплины в виде **зачета** в соответствии с графиком учебного процесса. Проверка наличия конспектов по дисциплине является допуском к зачету. В случае наличия учебной задолженности (пропущенных занятий и (или) невыполненных заданий), аспирант отрабатывает пропущенные занятия и выполняет задания.

Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

Вопросы для зачета

Раздел 1. Структура верхней атмосферы

1. Общее строение верхней атмосферы. Атмосферные слои, терминология.
2. Гидростатическое равновесие.
3. Атмосферные ветры. Геоострофический ветер. Термический ветер.
4. Энергетический баланс в атмосферных слоях.
5. Вертикальное строение ионосферы.
6. Пространственно-временная структура ионосферы.
7. Высокоширотная ионосфера.
8. Экваториальная ионосфера.

Раздел 2. Основные физические процессы в ионосфере

1. Химические реакции в ионосферной плазме.
2. Фотохимическое равновесие и формирование нижней ионосферы (слои D, E, F1).
3. Амбиполярная диффузия.
3. Диффузия ионосферной плазмы и образование среднеширотного F2-слоя.
4. Скорость фотоионизации в однородной атмосфере. Теория простого слоя.
5. Корпускулярная ионизация и авроральный овал.

Раздел 3. Образование ионосферных слоев.

1. Образование D – области ионосферы.
2. Образование E и F1-слоев ионосферы.
3. Образование F2-области ионосферы.
4. Эффективные коэффициенты рекомбинации в ионосферных слоях.

Раздел 4. Взаимодействие ионосферы с плазмосферой

1. Внешняя ионосфера и взаимодействие с плазмосферой.
2. Перенос плазмы между геомагнитно сопряженными ионосферами. Плазмосферный резервуар.
3. Заполнение плазмосферного резервуара ионосферной плазмой.
4. Полярный ветер.

Раздел 5. Электродинамика ионосферы

1. Проводимость ионосферной плазмы.
2. Ионосферное динамо. Генерация электрических полей в ионосфере.
3. Роль дрейфов ионосферной плазмы в ионосфере высоких и экваториальных широт.

Раздел 6. Нерегулярные явления в ионосфере

1. Типы ионосферных возмущений.
2. Спорадический E слой. Морфология и механизмы образования.
3. Реакция ионосферы на солнечные вспышки.
4. Ионосферные бури.

Задания к зачету

Раздел 1. Структура верхней атмосферы

1. Оцените полную массу атмосферы Земли и сравните ее с массой Земли. Средняя плотность Земли 5 г/см^3 , средний радиус Земли 6300 км.

2. Покажите, что если шкала высот атмосферы линейно зависит от высоты h

$$H(z) = H_0 + \beta h,$$

то высотный профиль давления будет иметь вид

$$P(h) = P_0 \left(\frac{H(h)}{H_0} \right)^{-1/\beta}.$$

3. Укажите направление геострофического ветра над Иркутском, если центр антициклона расположен в Якутии.

Раздел 2. Основные физические процессы в ионосфере

1. Получите уравнение для определения уровня перехода от области фотохимического равновесия к диффузионному равновесию.

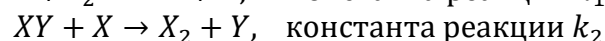
2. Характерное время жизни атома X в бинарной реакции равно 15 минутам. Вычислите долю атомов X, которая останется после 45 мин.

3. Найдите максимальное значение скорости фотоионизации, высотный профиль которой имеет вид:

$$q(z) = q_0 \exp(1 - z - \sec \chi \cdot \exp(-z)).$$

Раздел 3. Образование ионосферных слоев

1. Концентрация XY в атмосфере определяется следующими реакциями



Выведите уравнение, которое связывает равновесные концентрации XY и Y₂.

2. Может ли в дневных условиях F2 слой образоваться ниже 200 км?

3. Вычислите величину электронной концентрации, если значения альфа и бета слоев Чепмена равны соответственно $3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$.

Раздел 4. Взаимодействие ионосферы с плазмосферой

1. Во сколько раз объем дипольной силовой трубки с $L = 5$ больше объема трубки с $L = 2$?

2. Во сколько раз время заполнения силовой трубки с $L = 5$ больше времени заполнения трубки с $L = 2$?

Раздел 5. Электродинамика ионосферы

1. Плотность тока в ионосфере определяется выражением

$$\vec{j} = \sigma_0 (\vec{E} \cdot \vec{b}) \vec{b} + \sigma_p \vec{b} \times (\vec{E} \times \vec{b}) + \sigma_H (\vec{b} \times \vec{E}),$$

где σ_0 , σ_p , σ_H - продольная, педерсеновская и холловская проводимости; $\vec{E}$ - вектор

электрического поля; $\vec{b}$ - единичный вектор магнитного поля. Выведите выражение для тензора проводимости в дипольной системе координат $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$, полагая

$$\vec{E} = E_1 \vec{e}_1 + E_2 \vec{e}_2 + E_3 \vec{e}_3; \quad \vec{b} = -\vec{e}_2.$$

Раздел 6. Нерегулярные явления в ионосфере

1. Объясните поведение F2-слоя ионосферы при усилении меридионального нейтрального ветра направленного к полюсу и к экватору.

Критерии оценки:

- оценка «зачтено» выставляется аспиранту, если основной материал усвоен, аспирант приобрел необходимые знания и умения;

- оценка «не зачтено» - если основной материал усвоен недостаточно, аспирант не приобрел необходимых знаний и умений