

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ  
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИВМиМГ СО РАН)



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИВМиМГ СО РАН  
М.А. Марченко  
июня 2023 г

**ПРОГРАММА**

Кандидатского экзамена по научной специальности  
1.6.18 Науки об атмосфере и климате

Составители:

Г.н.с., д.ф.-м.н.

Зам. директора по научной работе д.ф.-м.н.

Г.А. Платов

А.В. Пененко

Новосибирск 2023

**Программа**  
**к кандидатскому экзамену по специальности**  
**1.6.18 Науки об атмосфере и климате**  
**(физико-математические науки)**

**1. Климатическая система Земли**

Основные компоненты климатической системы: атмосфера, гидросфера, литосфера, криосфера, биосфера. Долгопериодная изменчивость климатической системы. Причины изменений климата. Методы исследований и восстановления климата прошлого. Изменения климата в геологическом прошлом. Изменения климата в историческое время. Изменения климата за период инструментальных наблюдений.

Роль океана в климатической системе Земли. Влияние обмена энергией и веществом между океаном и атмосферой на погоду и климат Земли, на развитие биохимических процессов в океане.

Процессы поглощения и рассеяния радиации атмосферными газами и примесями. Оптически активные газы. Парниковый эффект. Газообмен между океаном, атмосферой: растворимость газов в морской воде; роль ледяного покрова в газообмене между океаном и атмосферой; основные составляющие газообмена.

Антропогенные изменения климата: изменения газового состава атмосферного воздуха, влияние городов на климат, влияние водохранилищ на микроклимат, влияние мелиоративных мероприятий на микроклимат болот. Глобальные изменения климата и их последствия.

Методы исследования в метеорологии и климатологии. Методы контактных и дистанционных наблюдений. Приземные, радиолокационные, аэрологические метеорологические наблюдения. Спутниковые наблюдения.

Методы оценки изменчивости климата. Аппарат разложения на естественные ортогональные функции. Механизм тихоокеанского десятилетнего колебания. Вероятные причины естественных колебаний в Северной Атлантике и Арктике. Формы крупномасштабного взаимодействия атмосферы и океана (Тропические циклоны, Северо-Атлантическое колебание, Эль-Ниньо). Методы исследования климатических процессов.

**2. Атмосфера**

Газовый состав атмосферы. Уравнение состояния сухого воздуха. Водяной пар в атмосфере. Характеристики влажности воздуха. Уравнение состояния влажного воздуха. Механизмы роста капель (конденсация, коагуляция броуновская и гравитационная). Рост ледяных кристаллов.

Образование осадков (механизмы Вегнера-Бержера и коагуляции). Распределение осадков на земном шаре. Виртуальная температура.

Переменные составные части воздуха: озон, пыль, естественные и искусственные примеси, аэрозоли. Источники аэрозольной и газовой компоненты земной атмосферы. Фотохимическая трансформация. Изменение состава воздуха с высотой. Распределение частиц аэрозоля по размерам. Скорость оседания аэрозоля. Эффекты рассеяния и поглощения света атмосферным аэрозолем. Экстинкция (закон Бугера). Рассеяние Ми. Рэлеевское рассеяние. Понятие о предельно допустимых концентрациях (ПДК), предельно допустимой экологической нагрузке.

Строение атмосферы. Принципы деления атмосферы на слои.

Основы статики атмосферы. Уравнение статики.

Вертикальный барический градиент и барическая ступень. Барометрическая формула. Изменение давления с высотой.

Основы термодинамики атмосферы. Первое начало термодинамики в применении к атмосфере.

Общие сведения о радиационных потоках в атмосфере. Коротковолновая и длинноволновая радиация. Солнце как источник энергии. Солнечная постоянная. Инсоляция. Годовой ход и зональное распределение сумм радиации. Альbedo для прямой и рассеянной радиации, его зависимость от высоты солнца. Альbedo для естественных поверхностей и Земли в целом. Длинноволновое излучение земной поверхности и атмосферы; эффективное излучение.

Пограничный слой атмосферы. Турбулентное перемешивание в атмосфере. Изменение температуры воздуха с высотой в пограничном слое. Суточный ход температуры воздуха в пограничном слое.

Вертикальная структура полей температуры и ветра. Термический ветер. Баротропное и бароклинное состояния. Струйные течения в тропосфере. Высотные фронтальные зоны. Планетарные циркуляции Гадлея (Хэдли) и Ферреля.

### **3. Океан**

Морская вода как природный объект. Химический состав морской воды. Главные компоненты солевого состава, микроэлементы, растворенные газы, органическое вещество, биогенные элементы. Соотношение пресных и морских вод на Земле, зоны их взаимодействия. Физические свойства морских вод. Температура. Соленость, ее определение. Давление. Плотность. Уравнение состояния. Температура замерзания, наибольшей плотности. Теплоемкость. Вязкость. Сжимаемость. Адиабатические эффекты. Стратификация.

Общие сведения об океанических бассейнах. Распределение гидрологических характеристик Мирового океана. Водные массы. Уровень Мирового океана. Колебания уровня, основные причины и закономерности распределения колебаний уровня. Общие сведения о крупномасштабной циркуляции океана.

3. Пресноводный баланс океана; его составляющие; методы их наблюдений и расчетов; запасы пресной воды на земном шаре, процессы перераспределения пресной воды. Основные компоненты солеобмена; составляющие солевого баланса; методы их расчетов.

4. Льды в море. Возрастные стадии льда. Характеристики ледяного покрова. Дрейф льда в Северном Ледовитом океане и его морях. Льды Южного океана. Методы наблюдений за льдами.

#### **4. Основы геофизической гидродинамики**

Основные уравнения геофизической гидродинамики. Масштабы движений в океане и атмосфере. Движение свободной частицы на вращающейся плоскости. Сила Кориолиса. Стратификация. Центробежная и центростремительная силы. Внешние силы. Законы сохранения массы, энергии, импульса. Уравнения движения: лагранжево и эйлерово представления. Уравнение состояния. Уравнение баланса соли.

Относительный и планетарный вихрь. Уравнение изменения циркуляции. Теорема Кельвина. Уравнение вихря. Механизмы изменения относительного вихря. Термический ветер. Теорема Тейлора-Праудмена. Потенциальный вихрь. Уравнение Эртеля. Сохранение потенциального вихря. Основные упрощающие приближения. Геострофическое приближение. Приближение Буссинеска. Стратификация. Частота Брента-Вяйсаля. Уравнения гидродинамики в приближении Буссинеска. Приближение  $f$  и бета-плоскости. Приближение квазистатики.

Нестационарные течения. Баротропная и бароклинная неустойчивость. Линейная задача о баротропной неустойчивости зонального потока. Нейтральные и растущие (неустойчивые) моды. Число Кибеля-Россби. Волны Россби. Линейная задача о бароклинной неустойчивости зонального потока. Модели циклогенеза: модели Иди, Чарни, Филлипса. Нелинейные эффекты бароклинной неустойчивости. Взаимодействие основного потока с волнами. Поток Элиассена - Пальма (ЭП).

Уравнения геофизической гидродинамики с учетом турбулентности. Осреднение уравнений. Замыкание уравнений Рейнольдса. Теория Колмогорова. Двухмерная турбулентность. Бароклинная турбулентность. Конвективная неустойчивость. Линейные задачи об упорядоченной конвекции в покоящемся слое и в слое со сдвигом ветра. Числа Ричардсона и Тэйлора. Вынужденная и свободная конвекция.

#### **5. Упрощенные модели океанической циркуляции**

Однородный геострофический поток. Уравнения мелкой воды. Приближение «твердой крышки». Метод полного потока Штокмана. Западная интенсификация течений. Теория Стомелла. Обобщение Манка. Теория дрейфовых течений Экмана. Придонный слой Экмана. Термохалинная циркуляция океана. Эффекты стратификации вод. Конвективное приспособление. Комбинация эффектов вращения и стратификации. Радиус деформации

Россби. Внутренние волны. Уравнения термического ветра. Геострофическое приспособление. Квази-геострофические модели. Сезонные изменения термоклина. Циркуляция океана в меридиональной плоскости.

## **6. Современные численные модели атмосферной и океанической циркуляции.**

Выбор системы координат. Физико-математическая постановка задачи. Основные уравнения, используемые для моделирования атмосферы, океана, морского льда. Масштабный анализ. Основные приближения. Граничные и начальные условия. Законы сохранения. Параметризация мезомасштабных процессов.

Построение сеточных аналогов уравнений математической модели и получение численного решения.. Системы вертикальных координат ( $z$ ,  $p$ ,  $\sigma$ , гибридная).

Методы интегрирования уравнений по времени: явные, неявные схемы, полу-неявные. Метод расщепления по физическим процессам. Численные схемы для аппроксимации переноса – диффузии трассеров. Аппроксимация и устойчивость численных схем.

Численные аналоги законов сохранения. Блок-схема численных моделей. Анализ результатов численного моделирования. Использование численных моделей в современных исследованиях.

## **7. Моделирование переноса и трансформации газовых примесей и аэрозолей в атмосфере**

Моделирование микроклимата города. Эйлеровы и Лагранжевы подходы к описанию переноса примесей. Модель переноса и диффузии пассивной примеси, аналитические решения. Модели переноса и трансформации многокомпонентных примесей в атмосфере. Модель динамики аэрозолей. Сопряженные уравнения модели переноса и трансформации примесей. Методы усвоения данных.

## **8. Методы инструментального исследования атмосферы**

Физические механизмы, лежащие в основе современных дистанционных методов. Наземные, зондовые, баллонные, самолетные и спутниковые методы наблюдения. Исследование параметров атмосферы с помощью естественных внешних источников излучения («на просвет»). Исследование атмосферы активными методами в оптическом и микроволновом диапазонах. Собственное исследование атмосферы и методы исследования, основанные на его регистрации.

### **Список литературы**

1. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. 1984, М., Мир., 798 с.
2. Дымников В.П., Залесный В.Б. Основы вычислительной геофизической гидродинамики. М. ГЕОС. 2019. 448 с.
3. Дымников В.П. Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов М.: ИВМ РАН, 2007. – 283 с.
4. Должанский Ф. Лекции по геофизической гидродинамике. Москва 2006.

5. Ле Блон П., Майзек Л. Волны в океане. 1981, т. 1, М., Мир, 365 с.
6. Каменкович В.М. Основы динамики океана. 1981, Л., Гидрометеиздат, 229 с.
7. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. 1986, т.1,2, М., Мир, 415 с.
8. Озмидов Р. В. Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане. 1968, М., «Наука», 192 с.
9. Должанский Ф. Лекции по геофизической гидродинамике. Москва 2006.
10. Гордов Е.П. Вычислительно-информационные технологии мониторинга и моделирования климатических изменений и их последствий./ Е.П. Городов, В.Н. Лыкосов, В.Н. Крупчатников и др. — Новосибирск: Наука, 2013. — 119 с.
11. Stommel H. Westward intensification of wind-driven Ocean currents. Trans. Amer. Geophys. Union, 1948, v. 29, No 2, 202-206.
12. Fofonoff. N.P. Steady flow in a frictionless homogeneous ocean. J. Mar. Res., 1954, v. 13, No 3, 254-262.
13. Монин А.С. Геофизическая гидродинамика. 1997, М., «Наука», 300 с.
14. Браже Р. А. Восемь лекций по физике атмосферы и гидросферы: учебное пособие / Р. А. Браже. – 2-е изд., испр. и доп. – Ульяновск, 2010. – 82 с.
15. Китайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л., Гидрометеиздат, 1970.
16. Краус Е.Б. Взаимодействие атмосферы и океана. Л., Гидрометеиздат, 1976.
14. Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана. Т. 2. Гидродинамика океана. М., Наука, 1978.
17. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 1. Т. 2. Л., Гидрометиздат, Т. 1, 1992. Т. 2, 1996.
18. Л.Т. Матвеев. Физика атмосферы. ГМИ, С.-П., 2000.
19. Суркова Г.В. Химия атмосферы. Учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2021. –210 с.
20. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию 1987 М: Мир
21. Г.И. Марчук Математическое моделирование в проблеме окружающей среды 1982 Наука
22. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды 1985 Наука: Новосибирск
23. Carrassi, Alberto / Vocquet, Marc / Bertino, Laurent / Evensen, Geir Data assimilation in the geosciences: An overview of methods, issues, and perspectives 2018-07 Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change , Vol. 9, No. 5 Wiley p. e535
24. Лазерный контроль атмосферы под ред. Хинкли, Э. Д. М:Мир 1979
25. Зуев, В. Е. / Зуев, В. В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы 1992 Гидрометеиздат: СПб
26. Киселев, В. Н. / Кузнецов, А. Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы) 2004 СПб: РГГМУ

#### Дополнительная литература:

1. Алоян, А. Е. Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. Монография 2008 М: Наука
2. Пененко, В. В. Методы численного моделирования атмосферных процессов 1981 Гидрометеиздат: Ленинград

3. К.В. Федулов, Н.М. Астафьева Структура климатических изменений (по палеоданным и данным инструментальной эпохи) Москва, 2008, Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 2008, 59стр. 2008  
<http://www.iki.rssi.ru/books/2008astafieva2.pdf>
4. Ю.П.Переведенцев Теория климата. Из-во Казанского университета, 2009, 503 с.
5. А.В.Кислов Климат в прошлом, настоящем и будущем. М.: МАИК «НаукаИнтерпериодика», 2001, 351 с.
6. Л.Т.Матвеев Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1991, 295 с.
7. Лобанов, В.А. Лекции по климатологии. Ч. 2. Динамика климата. Кн. 1. В 2 кн.: учебник. – СПб.: РГГМУ, 2016. – 332 с.
8. Лобанов, В.А. Лекции по климатологии. Ч. 2. Динамика климата. Кн. 2. В 2 кн.: учебник. – СПб.: РГГМУ, 2018. – 377 с.
9. Н.В. Мякишева Климатическая система Земли: прошлое и настоящее. Санкт-Петербург РГГМУ, 2022,  
[http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/rid\\_ab6aa96267cc4a58b7359dd884fd7336.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_ab6aa96267cc4a58b7359dd884fd7336.pdf)