

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра метеорологических прогнозов

Рабочая программа по дисциплине

**ВИХРЕВАЯ ДИНАМИКА**

Основная профессиональная образовательная программа  
высшего образования программы бакалавриата по направлению  
подготовки

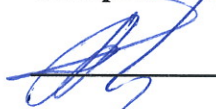
**05.03.04 Гидрометеорология**

Направленность (профиль)  
**Гидрометеорология**

Квалификация:  
**Бакалавр**

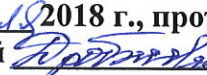
Форма обучения  
**Очная**

Согласовано  
Руководитель ОПОП  
«Гидрометеорология»

  
Абанников В.Н.

Утверждаю  
Председатель УМС  И.И. Палкин

Рекомендована решением  
Учебно-методического совета  
19 июня 2018 г., протокол № 4

Рассмотрена и утверждена на заседании кафедры  
20 апреля 2018 г., протокол № 7  
Зав. кафедрой  Дробжева Я.В.

Авторы-разработчики:  
 Погорельцев А.И.

Санкт-Петербург 2018

Рекомендована учёным советом метеорологического факультета РГГМУ  
(Протокол №\_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_г.)

Составил: А.И. Погорельцев, доктор физ.-мат. наук, заведующий кафедрой метеорологических прогнозов РГГМУ.

Рецензент: Н.М. Гаврилов, доктор физ.-мат. наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета.

© Погорельцев А.И., 2017  
© РГГМУ, 2017

## 1. Цели освоения дисциплины

Цель дисциплины «Вихревая динамика» – формирование у студентов комплекса научных знаний о свойствах и особенностях крупномасштабных динамических процессов, протекающих в атмосфере Земли, их взаимосвязи и взаимодействии, а также о современных методах их моделирования, диагностики и анализа.

Основные задачи дисциплины связаны с изучением и освоением студентами: основных уравнений и математического аппарата, используемых для описания и диагностики динамических процессов; характеристик волновых возмущений и их роли в формировании общей циркуляции и термической структуры атмосферы; методов анализа процессов генерации, распространения и нелинейных взаимодействий крупномасштабных волновых движений.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Вихревая динамика» для направления подготовки 05.03.04 – Гидрометеорология относится к дисциплинам по выбору обучающегося.

Для освоения данной дисциплины, обучающиеся должны освоить разделы дисциплин: «Математика», «Вычислительная математика», «Физика», «Механика жидкостей и газа» (Геофизическая гидродинамика), «Физическая метеорология», «Методы наблюдения и анализа в гидрометеорологии», «Динамическая метеорология».

Дисциплина «Вихревая динамика» может быть использована при подготовке выпускной работы бакалавра.

## 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

Код компетенции	Компетенция
<b>ОПК-1</b>	владение базовыми знаниями в области фундаментальных разделов математики в объеме, необходимом для владения математическим аппаратом в гидрометеорологии, для обработки и анализа данных, прогнозирования гидрометеорологических характеристик
<b>ОПК-5</b>	владение знаниями основ природопользования, экономики природопользования, оценки воздействия на окружающую среду, правовых основ природопользования и охраны окружающей среды
<b>ОПК-6</b>	способность решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности
<b>ПК-2</b>	способность понимать, излагать и критически анализировать базовую информацию в гидрометеорологии при составлении разделов научно-технических отчетов, пояснительных записок, при подготовке обзоров, аннотаций, составлении рефератов и библиографии по тематике проводимых исследований
<b>ППК-1</b>	способность получать и проводить контроль качества оперативных гидрометеорологических данных, применять современные методы анализа и аппаратные средства обработки информации при работе с текущими и архивными данными

В результате освоения компетенций в рамках дисциплины «Вихревая динамика» обучающийся должен:

**знать:**

- различные формы записи уравнений гидротермодинамики и основы векторной алгебры;
- понятие адиабатического приближения и основные адиабатические инварианты (термодинамические - энтропия, потенциальная температура и динамический - потенциальный вихрь Эртеля);
- закон сохранения вихревого заряда (вихревой субстанции) Обухова;
- физическую и математическую постановки задачи о разделении крупномасштабных атмосферных движений на среднюю (фоновую) и волновую (вихревую) составляющие;
- методы возмущений и комплексных амплитуд, правила осреднения;
- теорию собственных колебаний атмосферы (приливное уравнение Лапласа, уравнение вертикальной структуры, нормальные атмосферные моды), классификацию атмосферных волн;
- линейную теорию атмосферных волн (фазовая и групповая скорости, дисперсионное соотношение, волновая энергия, потоки энергии, тепла и импульса, закон сохранения волнового действия).

**уметь:**

- применять математический аппарат векторной алгебры и тензорного исчисления для получения уравнений и тождеств, используемых при выводе основных законов сохранения (законы сохранения энергии и вихревого заряда, уравнения Фридмана и Гельмгольца, теорема о потенциальном вихре Эртеля);
- использовать методы теории возмущений, комплексных амплитуд и правила осреднения нелинейных членов при получении уравнений, описывающих взаимодействие волн со средним потоком.

Кроме этого, бакалавр **должен иметь представление** об основных физических явлениях и процессах, наблюдаемых в атмосфере, которые обусловлены взаимодействием планетарных волн со средним потоком (внезапные стратосферные потепления, стратосферные васцилляции, квази-двухлетние колебания зонального потока).

Основные признаки освоения формируемых компетенций в результате освоения дисциплины «Вихревая динамика» сведены в таблице.

Соответствие уровней освоения компетенцией планируемым результатам обучения и критериям их оценивания

Этап (уровень) освоения компетенции	Основные признаки освоения компетенцией (описание уровня)				
	1.	2.	3.	4.	5.
минимальный	не владеет	слабо ориентируется в терминологии и содержании	Способен выделить основные идеи текста, работает с критической литературой	Владеет основными навыками работы с источниками и критической литературой	Способен дать собственную критическую оценку изучаемого материала
	не умеет	не выделяет основные идеи	Способен показать основную идею в развитии	Способен представить ключевую проблему в ее связи с другими процессами	Может соотнести основные идеи с современными проблемами
	не знает	допускает грубые ошибки	Знает основные рабочие категории, однако не ориентируется в их специфике	Понимает специфику основных рабочих категорий	Способен выделить характерный авторский подход
базовый	не владеет	плохо ориентируется в терминологии и содержании	Владеет приемами поиска и систематизации, но не способен свободно изложить материал	Свободно излагает материал, однако не демонстрирует навыков сравнения основных идей и концепций	Способен сравнивать концепции, аргументированно излагает материал
	не умеет	выделяет основные идеи, но не видит проблем	Выделяет конкретную проблему, однако излишне упрощает ее	Способен выделить и сравнить концепции, но испытывает сложности с их практической привязкой	Аргументированно проводит сравнение концепций по заданной проблематике
	не знает	допускает много ошибок	Может изложить основные рабочие категории	Знает основные отличия концепций в заданной проблемной области	Способен выделить специфику концепций в заданной проблемной области
продвинутый	не владеет	ориентируется в терминологии и содержании	В общих чертах понимает основную идею, однако плохо связывает ее с существующей проблематикой	Видит источники современных проблем в заданной области анализа, владеет подходами к их решению	Способен грамотно обосновать собственную позицию относительно решения современных проблем в заданной области
	не умеет	выделяет основные идеи, но не видит их в развитии	Может понять практическое назначение основной идеи, но затрудняется выявить ее основания	Выявляет основания заданной области анализа, понимает ее практическую ценность, однако испытывает затруднения в описании сложных объектов анализа	Свободно ориентируется в заданной области анализа. Понимает ее основания и умеет выделить практическое значение заданной области
	не знает	допускает ошибки при выделении рабочей области анализа	Способен изложить основное содержание современных научных идей в рабочей области анализа	Знает основное содержание современных научных идей в рабочей области анализа, способен их сопоставить	Может дать критический анализ современным проблемам в заданной области анализа

#### 4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы, 144 часа.

Объём дисциплины	Всего часов	
	Очная форма обучения	
	2016, 2017, 2018 года набора	2015 год набора
<b>Общая трудоёмкость дисциплины</b>	<b>144</b>	
<b>Контактная работа обучающихся с преподавателям (по видам аудиторных учебных занятий) – всего:</b>	<b>72</b>	<b>84</b>
в том числе:		
лекции	<b>36</b>	<b>42</b>
практические занятия	<b>36</b>	<b>42</b>
<b>Самостоятельная работа (СРС) – всего:</b>	<b>54</b>	<b>42</b>
в том числе:		
курсовая работа	-	
контрольная работа	-	
<b>Вид промежуточной аттестации (зачет/экзамен)</b>	<b>Экзамен</b> (трудозатраты при подготовке и сдаче экзамена 18 часов)	

#### 4.1.Содержание разделов дисциплины

2016, 2017, 2018 года набора

п/п	Раздел и тема дисциплины	Семестр	Виды учебной работы, в т.ч. самостоятельная работа студентов, час.				Формы текущего контроля успеваемости	Занятия в активной и интерактивной форме, час.	Формируемые компетенции
			Лекции	Семинары Лаборат. Практика	Самост. работа				
1	Особенности гидродинамики геофизических течений, векторная алгебра	8	2	2	5	Вопросы на лекции	0	ОПК-1 ОПК-5 ОПК-6	
2	Уравнения гидротермодинамики	8	4	4	5	Вопросы на лекции	0	ОПК-1 ОПК-5 ОПК-6	
3	Энергетика атмосферных движений	8	4	4	5	Вопросы на лекции	1	ОПК-1 ОПК-5 ОПК-6	
4	Уравнения Фридмана и Гельмгольца	8	4	4	6	Вопросы на лекции	1	ПК-2 ОПК-1 ОПК-6	
5	Теорема о потенциальном	8	2	2	5	Вопросы на	1	ОПК-5	

	вихре Эртеля					лекции		ОПК-6 ПК-2
6	Метод комплексных амплитуд	8	4	4	5	Вопросы на лекции	1	ОПК-1 ОПК-5 ОПК-6
7	Планетарные волны, вихревые потоки	8	4	4	7	Вопросы на лекции	2	ОПК-1 ПК-2 ППК-1
8	Линейная теория глобальных и внутренних гравитационных волн	8	4	4	5	Вопросы на лекции	1	ОПК-5 ОПК-6 ПК-2 ППК-1
9	Уравнение баланса энергии для возмущений	8	4	4	5	Вопросы на лекции	1	ОПК-5 ПК-2 ППК-1
10	Закон сохранения действия, поток Элиассена-Пальма	8	4	4	6	Вопросы на лекции	1	ОПК-5 ПК-2 ППК-1
<b>ИТОГО:</b>			<b>36</b>	<b>36</b>	<b>54</b>		<b>9</b>	
<b>С учетом трудозатрат при подготовке и сдачи экзамена (18 часов)</b>						<b>144 часа</b>		

2015 год набора

п/п	Раздел и тема дисциплины	Семестр	Виды учебной работы, в т.ч. самостоятельная работа студентов, час.				Формы текущего контроля успеваемости	Занятия в активной и интерактивной форме, час.	Формируемые компетенции
			Лекции	Семинары Лаборат. Практика	Самост. работа				
1	Особенности гидродинамики геофизических течений, векторная алгебра	8	2	2	3	Вопросы на лекции	0	ОПК-1 ОПК-5 ОПК-6	
2	Уравнения гидротермодинамики	8	6	4	4	Вопросы на лекции	0	ОПК-1 ОПК-5 ОПК-6	
3	Энергетика атмосферных движений	8	4	4	4	Вопросы на лекции	1	ОПК-1 ОПК-5 ОПК-6	
4	Уравнения Фридмана и Гельмгольца	8	6	4	5	Вопросы на лекции	1	ПК-2 ОПК-1 ОПК-6	
5	Теорема о потенциальном вихре Эртеля	8	2	2	5	Вопросы на лекции	1	ОПК-5 ОПК-6 ПК-2	
6	Метод комплексных амплитуд	8	4	4	4	Вопросы на лекции	1	ОПК-1 ОПК-5	

								ОПК-6
7	Планетарные волны, вихревые потоки	8	4	4	7	Вопросы на лекции	2	ОПК-1 ПК-2 ППК-1
8	Линейная теория глобальных и внутренних гравитационных волн	8	6	6	3	Вопросы на лекции	1	ОПК-5 ОПК-6 ПК-2 ППК-1
9	Уравнение баланса энергии для возмущений	8	4	6	3	Вопросы на лекции	1	ОПК-5 ПК-2 ППК-1
10	Закон сохранения действия, поток Элиассена-Пальма	8	4	6	4	Вопросы на лекции	1	ОПК-5 ПК-2 ППК-1
<b>ИТОГО:</b>			<b>42</b>	<b>42</b>	<b>42</b>		<b>9</b>	
<b>С учетом трудозатрат при подготовке и сдачи экзамена (18 часов)</b>						<b>144 часа</b>		

## 4.2. Содержание разделов дисциплины

### 4.2.1. Особенности гидродинамики геофизических течений, векторная алгебра

Стратифицированная среда, энтропия и потенциальная температура, статическая стабильность, конвективная неустойчивость, гравитационные волны, баротропность и бароклинность, вращение, сила Кориолиса, волны Россби, сила Лоренца.

Векторы и действия над ними, скалярное и векторное произведения, линейное преобразование, понятие тензора, скалярное поле и градиент, векторное поле и силовые линии, потенциальные векторные поля, понятия циркуляции, дивергенции и вихря, теоремы Остроградского-Гаусса и Стокса, соотношения векторной алгебры.

### 4.2.2. Уравнения гидротермодинамики

Гидродинамическая группа. Уравнение движения в форме Эйлера, массовые и объемные силы, потенциальные и инерционные силы, сила тяжести и Кориолиса, «примитивные» уравнения, гидростатическое и геострофическое приближения, сила внутреннего трения (вязкости) и сила Лоренца, тензор вязких напряжений, закон Ома для ионосферной плазмы, проводимости Педерсена и Холла, ионное трение, магнитное закручивание. Уравнение неразрывности, понятия несжимаемости и соленидальности.

Термодинамическая группа. Уравнение притока тепла, энтропия и потенциальная температура, теплопроводность, неадиабатические притоки тепла, нагрев за счет диссипации механической энергии, адиабатическое приближение. Уравнение состояния идеального газа Менделеева-Клапейрона.

### 4.2.3. Энергетика атмосферных движений

Уравнение баланса механической энергии, обусловленный вязкостью поток механической энергии, тензор сухого (ионного) трения, потери механической энергии за счет вязкой диссипации и трения.

Уравнение баланса внутренней энергии, притоки тепла за счет диссипации механической энергии и теплопроводности, изменение внутренней энергии за счет работы, затрачиваемой на расширение или сжатие, переходы механической энергии во внутреннюю и обратно.



Уравнения баланса полной, потенциальной и кинетической энергии, адиабатические процессы взаимного преобразования кинетической и потенциальной энергии.

#### **4.2.4. Уравнения Фридмана и Гельмгольца**

Функция Экслера, удельная энтальпия, уравнение движения в форме Громеки-Лэмба, функция Бернулли, уравнение трансформации вихря скорости (Фридмана), гельмгольциан, «укороченный» гельмгольциан, уравнение Гельмгольца, понятие «вмороженности» векторного поля в движущуюся жидкость. Тождество, описывающее изменение со временем скалярного произведения произвольного вектора на градиент произвольной скалярной функции, отнесенного к плотности жидкости.

#### **4.2.5. Теорема о потенциальном вихре Эртеля**

Общий вид уравнения баланса скалярной и/или векторной величины, понятие консервативной величины, гидродинамические или лагранжевы инварианты, адиабатическое приближение, инварианты адиабатического движения, формулировка и доказательство теоремы Эртеля на основе полученного в предыдущем разделе тождества, потенциальный вихрь Эртеля, уравнение трансформации потенциального вихря Эртеля при наличии потенциальных сил или нарушении условия адиабатичности.

Закон сохранения вихревого заряда или «потенциальной вихревой субстанции» Обухова, получение приближенного выражения для потенциального вихря Эртеля в сферической системе координат.

#### **4.2.6. Метод комплексных амплитуд**

Гармонические (монохроматические) колебания и плоские волны, временной и пространственный профиль волны, волновое число, круговая частота и фазовая скорость, длина волны и период, амплитуда, полная и начальная фазы волны, волновое уравнение.

Комплексная амплитуда гармонической волны, формула Эйлера, волновое уравнение Гельмгольца, правила осреднения нелинейных по амплитуде волны выражений, использование метода комплексных амплитуд при рассмотрении нелинейных функций.

#### **4.2.7. Планетарные волны, вихревые потоки**

Атмосферные волны глобального масштаба, приближенные уравнения для описания крупномасштабных движений атмосферы, лог-изобарическая система координат, уравнение сохранения энергии в различных системах координат, понятие доступной потенциальной энергии.

Разбиение движений на зональноосредненные (среднезональные) и отклонения от них, зональные гармоники, планетарные волны, уравнения для средних величин и возмущений, вихревые потоки и взаимодействия.

#### **4.2.8. Линейная теория глобальных и внутренних гравитационных волн**

Приливный оператор Лапласа, функции Хафа, параметр Лэмба и эквивалентная глубина, атмосферные моды, классификация глобальных атмосферных волн на основе дисперсионных кривых, гравитационные и инерционные моды, волны Кельвина и Янаи.

Уравнение вертикальной структуры, вынужденные и свободные решения, внутренние и внешние волны, собственные колебания атмосферы, нормальные атмосферные моды, волны Лэмба, нижнее граничное условие в геометрической и лог-изобарической системах координат.

#### 4.2.9. Уравнение баланса энергии для возмущений

Уравнения баланса кинетической, упругой и термобарической энергии возмущений, взаимное превращение различных составляющих волновой энергии, волновой поток энергии, выбор знака перед вертикальным волновым числом на основе энергетических соображений (знака потока волновой энергии), понятие групповой скорости, разность знаков вертикальных составляющих фазовой и групповой скоростей.

#### 4.2.10. Закон сохранения волнового действия, поток Элиассена-Пальма

Понятие установившейся волны, линеаризация уравнений для возмущений среднезонального состояния, выражения для потоков волновой энергии через меридиональный поток тепла и потоки импульса, вывод закона сохранения волнового действия для планетарных волн, закон сохранения волнового действия для внутренних гравитационных волн без диссипации, плотность волнового действия и обобщение понятия групповой скорости.

Обобщенная теорема Элиассена-Пальма, плотность волновой активности, поток Элиассена-Пальма, понятие «псевдоимпульса» или «эффективного потока импульса».

#### 4.3. Семинарские, практические, лабораторные занятия, их содержание

*(Семинарских и лабораторных занятий программой не предусмотрено)*

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практических занятий	Форма проведения	Формируемые компетенции
1	1	Скалярные и векторные поля, дифференциальные характеристики полей.	Решение задач	ОПК-1, ОПК-5 ОПК-6
2	2	Динамическая группа уравнений.	Решение задач	ОПК-1, ОПК-5 ОПК-6
3	2	Сила внутреннего трения и сила Лоренца.	Решение задач	ОПК-1, ОПК-5 ОПК-6
4	3	Вязкая диссипация механической энергии, тензор вязких напряжений.	Решение задач	ОПК-1, ОПК-5 ОПК-6
5	4	Уравнение Фридмана, гельмольциан, уравнение Гельмгольца.	Решение задач	ПК-2, ОПК-1 ОПК-6
6	5	Теорема сохранения потенциального вихря Эртеля. полученная на основании тождества для оператора Гельмгольца.	Решение задач	ОПК-5, ОПК-6 ПК-2
7	6	Комплексное число, понятие комплексной амплитуды, взаимодействие волн и среднего потока.	Решение задач	ОПК-1, ОПК-5 ОПК-6
8	7	Вывод идентичности уравнения сохранения энергии в геометрической и лог-изобарической системах координат.	Решение задач	ОПК-1, ПК-2 ППК-1
9	8	Функции Хафа, уравнение широтной структуры, приливной оператор Лапласа.	Решение задач	ОПК-5, ОПК-6 ПК-2, ППК-1

## **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов и оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

### **5.1. Текущий контроль**

Вопросы на лекции

#### **а). Образцы заданий текущего контроля**

##### **Вопросы на лекции:**

1. В чем заключаются особенности геофизической гидродинамики?
2. Какие типы волн существуют в атмосфере Земли?
3. К каким эффектам приводит учет силы Лоренца в уравнении движения нейтрального газа?
4. Какие преимущества использование лог-изобарической системы координат?
5. При рассмотрении каких задач можно использовать адиабатическое приближение?
6. К каким эффектам приводит учет вязкости и теплопроводности?
7. Как формулируется теорема о сохранении потенциального вихря Эртеля?
8. В чем заключаются преимущества использования метода комплексных амплитуд?
9. Каковы правила осреднения квадратичных слагаемых при рассмотрении взаимодействия волн со средним потоком?
10. Что описывает приливный оператор Лапласа?
11. Что такое собственные колебания атмосферы?
12. Как можно классифицировать волновые возмущения на основе анализа уравнения вертикальной структуры?
13. Что характеризуют фазовая и групповая скорости?
14. Какие типы волновой энергии существуют?

#### **б). Примерная тематика рефератов, эссе, докладов**

Выполнение рефератов, эссе и докладов по данной дисциплине не предусмотрено.

#### **в). Примерные темы курсовых работ, критерии оценивания**

Выполнение курсовых работ по данной дисциплине не предусмотрено учебным планом.

### **5.2. Методические указания по организации самостоятельной работы**

В течение семестра студент обязан самостоятельно прорабатывать материал, изложенный на лекциях, для чего рекомендуется использовать сделанные на лекциях конспекты, изучить основную и дополнительную литературу, презентации лекций и практических работ. Освоение материалом и выполнение практических работ проходит при регулярных, по возможности, консультациях с преподавателем, для чего студенту предоставлена возможность использовать удаленный доступ (Интернет).

### **5.3. Промежуточный контроль: экзамен**

#### **Перечень вопросов к экзамену:**

1. Особенности гидродинамики природных течений жидкости (стратификация, вращение, бароклинность, сила Лоренца).

2. Трансформированный Эйлеров подход, «остаточная» меридиональная циркуляция, теорема о невзаимодействии (неускорении) волн со средним потоком Чарни-Дразина.
3. Векторы и действия над ними, скалярное и векторное произведения. Линейное преобразование, понятие тензора. Скалярное поле и градиент.
4. Нагрев и охлаждение атмосферы при диссипации волн.
5. Векторное поле, понятия циркуляции, дивергенции и вихря, теоремы Остроградского-Гаусса и Стокса, соотношения векторной алгебры.
6. Линеаризованное уравнение потенциального вихря Эртеля, явные выражения для плотности волновой активности, выражение для дивергенции вектора потока Элиассена-Пальма через параметры диссипации (коэффициенты рэлеевского трения и радиационного затухания)
7. Уравнения динамической группы. Приближенные («примитивные») уравнения (какие приближения сделаны). Лог-изобарическая система координат (в чем преимущества). Сила внутреннего трения и сила Лоренца (к каким эффектам приводит учет вязкости и электромагнитной силы).
8. Линейная теория глобальных атмосферных волн. Приливное уравнение Лапласа. Собственные колебания атмосферы (нормальные моды).
9. Уравнения термодинамической группы. Понятие потенциальной температуры, связь с энтропией.
10. Уравнение вертикальной структуры, внутренние и внешние волны.
11. Уравнение механической энергии. Уравнение внутренней энергии. Переходы механической энергии во внутреннюю и обратно. Уравнения баланса полной, потенциальной и кинетической энергии.
12. Классификация глобальных атмосферных волн на основе дисперсионных кривых (зависимости собственных значений приливного оператора Лапласа от частоты).
13. Уравнения Фридмана и Гельмгольца.
14. Гармонические колебания и волны (основные понятия).
15. Тождество, описывающее изменение со временем скалярного произведения произвольного вектора на градиент произвольной скалярной функции, отнесенного к плотности жидкости.
16. Волновое уравнение. Фазовая и групповая скорости.
17. Сохранение потенциального вихря Эртеля (вывод на основе тождества, содержащего оператор Гельмгольца).
18. Уравнение сохранения энергии в лог-изобарической системе. Энтальпия, доступная потенциальная энергия.
19. Теорема о сохранении вихревого заряда в сжимаемой жидкости (альтернативный вывод теоремы Эртеля).
20. Метод комплексных амплитуд. Правила осреднения нелинейных (квадратичных) по амплитуде волны слагаемых.
21. Возмущения среднезонального состояния атмосферы. Вихревые потоки тепла и импульса.
22. Уравнение сохранения потенциально вихря Эртеля в лог-изобарической системе координат.
23. Понятие установившейся волны, линеаризация уравнений для возмущений среднезонального состояния, выражения для потоков волновой энергии через меридиональный поток тепла и потоки импульса.
24. Теорема о невзаимодействии волн со средним потоком Чарни-Дразина.
25. Функции Хафа, параметр Лэмба и эквивалентная глубина, атмосферные моды.
26. Закон сохранения волнового действия для планетарных и внутренних гравитационных волн.
27. Функция Экслера, удельная энтальпия, уравнение движения в форме Громеки-Лэмба, функция Бернулли.
28. Поток Элиассена-Пальма, закон сохранения волновой активности.

29. Лагранжевы инварианты. Адиабатическое приближение.
30. Интерпретация дивергенции вектора потока Элиассена-Пальма с учетом знака широтного градиента потенциально вихря Эртеля и/или знака плотности волновой активности

### Образцы билетов к экзамену

#### Экзаменационный билет №5.

Российский государственный гидрометеорологический университет  
Кафедра метеорологических прогнозов  
Курс Вихревая динамика

1. Уравнения термодинамической группы. Понятие потенциальной температуры, связь с энтропией.
2. Уравнение вертикальной структуры, внутренние и внешние волны.

Заведующий кафедрой: \_\_\_\_\_ (Дробжева Я.В.)

---

#### Экзаменационный билет №14.

Российский государственный гидрометеорологический университет  
Кафедра метеорологических прогнозов  
Курс Вихревая динамика

1. Функция Экслера, удельная энтальпия, уравнение движения в форме Громеки-Лэмба, функция Бернулли.
2. Поток Элиассена-Пальма, закон сохранения волновой активности.

Заведующий кафедрой: \_\_\_\_\_ (Дробжева Я.В.)

---

### 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

#### а) основная литература:

1. Переведенцев, Ю. П. Теория общей циркуляции атмосферы [Текст] : учебное пособие / Ю. П. Переведенцев, И. И. Мохов, А. В. Елисеев. - Казань : Казан. гос. ун-т, 2013. - 223 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21595571>
2. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере.- М.: Мир. 1978, 532 с. [http://нэб.рф/catalog/000199\\_000009\\_008690790/](http://нэб.рф/catalog/000199_000009_008690790/)

#### б) дополнительная литература:

1. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. I, II.-М.: Физматгиз. 1963. 584 с.
2. Холтон Дж.Р. Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы.- Л.: Гидрометеиздат. 1979. 224 с.
3. Дикий Л.А. Теория колебаний земной атмосферы.- Л.: Гидрометеиздат. 1969. 196 с.
4. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости.- М.: Мир, 1973.
5. Курганский М.В. Введение в крупномасштабную динамику атмосферы (адиабатические инварианты и их применение).- Санкт-Петербург: Гидрометеиздат. 1993. 168 с.
6. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика.- Т. 1,2.- М.: Мир. 1984. 816 с.

7. Монин А.С. Теоретические основы геофизической гидродинамики.- Л.: Гидрометеиздат. 1988. 424 с.
8. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы.- Л.: Гидрометеиздат. 1988. 414 с.
9. Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы.- М.: Наука. 1974. 256 с.
10. Динамика погоды (под редакцией С. Манабе).- Л.: Гидрометеиздат. 1988. 424 с.
11. Динамика климата (под редакцией С. Манабе).- Л.: Гидрометеиздат. 1988. 424 с.
12. Крупномасштабные динамические процессы в атмосфере (под редакцией Б. Хоскинса и Р. Пирса).- М.: Мир. 1988. 432 с.
13. Галин М.Б. Поток Элиассена-Пальма и диагностика крупномасштабных атмосферных процессов//Метеорология и гидрология.- 1989, № 1.- С. 111-119.
14. Кочин Н.Е. Векторное исчисление и начало тензорного исчисления, изд. АН СССР, 1961.
15. Andrews D.G. On the interpretation of the Eliassen-Palm flux divergence//Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.- 1987.- Vol. 113.- P. 323-338.
16. Boyd J.P. The noninteraction of waves with the zonally averaged flow on a spherical Earth and the interrelationships of energy, heat and momentum//J. Atmos. Sci.- 1976.- Vol. 33.- P. 2285-2291.
17. Haynes P. Stratospheric dynamics//Annu. Rev. Fluid Mech.- 2005.- V. 37.- P. 263-293.
18. Masaki S. Atmospheric Circulation Dynamics and General Circulation Models.- Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, 756 p.
19. Salby M.L. Physics of the Atmosphere and Climate.- Cambridge University Press, NY, 2012, 717 p.
20. B.J. Hoskins & I.N. James Fluid dynamics of the midlatitude atmosphere.-John Wiley & Sons, Ltd. 2014. P. 432.

**в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

1. Электронный ресурс. Данные ре-анализов NASA: <http://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/>
2. Электронный ресурс. Данные ре-анализов NASA: [http://gmao.gsfc.nasa.gov/products/documents/MERRA\\_File\\_Specification.pdf](http://gmao.gsfc.nasa.gov/products/documents/MERRA_File_Specification.pdf)
3. Электронный ресурс. Данные ре-анализов UK MET OFFICE <http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/ukmo-assim>
4. Электронный ресурс. Данные ре-анализов UK MET OFFICE <http://badc.nerc.ac.uk/help/software/xconv/ind>

**7. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

**Вид учебных занятий**

**Организация деятельности студента**

**Лекции (темы №1-10)** Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометить важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий, технических характеристик с помощью интернет ресурсов с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначить вопросы, термины, материал, который вызывает трудности, пометить и попытаться найти ответ в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции, на консультации, или с использованием удаленного доступа через Интернет

- Практические занятия (темы №1-9)** Проработка рабочей программы, уделяя особое внимание целям и задачам структуре и содержанию дисциплины.  
Конспектирование источников.  
Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы и работа с текстом.  
Решение тестовых заданий, решение задач и другие виды работ.
- Подготовка к экзамену** При подготовке к экзамену необходимо ориентироваться на конспекты лекций, рекомендуемую литературу, вопросы для подготовки к экзамену и т.д.

### 8. Информационные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Тема (раздел) дисциплины	Образовательные и информационные технологии	Перечень программного обеспечения и информационных справочных систем
Темы 1 -11	<p><u>информационные технологии</u></p> <p>1. чтение лекций с использованием слайд-презентаций,</p> <p>2. организация взаимодействия с обучающимися посредством электронной почты</p> <p>3. работа с базами данных</p> <p><u>образовательные технологии</u></p> <p>1. интерактивное взаимодействие педагога и студента</p> <p>2. сочетание индивидуального и коллективного обучения</p>	<p>1. Пакет PowerPoint.</p> <p>2. Электронно-библиотечная система ГидроМетеоОнлайн <a href="http://elib.rshu.ru">http://elib.rshu.ru</a></p> <p>3. Использование сайта кафедры метеорологических прогнозов: <a href="http://ra.rshu.ru/mps/dwn/apogor/Динамик а/">http://ra.rshu.ru/mps/dwn/apogor/Динамик а/</a></p> <p>4. Данные ре-анализов NASA: <a href="http://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/">http://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/</a></p> <p>5. Данные ре-анализов NASA: <a href="http://gmao.gsfc.nasa.gov/products/documents/MERRA_File_Specification.pdf">http://gmao.gsfc.nasa.gov/products/documents/MERRA_File_Specification.pdf</a></p> <p>6. Данные ре-анализов UK MET OFFICE <a href="http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/ukmo-assim">http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/ukmo-assim</a></p> <p>7. Данные ре-анализов UK MET OFFICE <a href="http://badc.nerc.ac.uk/help/software/xconv/ind">http://badc.nerc.ac.uk/help/software/xconv/ind</a></p> <p>8. пакет прикладных программ, предназначенных для анализа и диагностики волновых процессов и нелинейных взаимодействий в атмосфере</p>

### 9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- 1. Учебная аудитории для проведения занятий лекционного типа** – укомплектована специализированной (учебной) мебелью, набором демонстрационного оборудования и учебно-наглядными пособиями, обеспечивающими тематические иллюстрации, соответствующие рабочим учебным программам дисциплин (модулей).
- 2. Учебная аудитории для проведения занятий семинарского типа** - укомплектована специализированной (учебной) мебелью, техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации, оснащенная компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечено доступом в электронную информационно-образовательную среду организации

3. **Учебная аудитория для групповых и индивидуальных консультаций** - укомплектована специализированной (учебной) мебелью, техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации.
4. **Учебная аудитория для текущего контроля и промежуточной аттестации** - укомплектована специализированной (учебной) мебелью, техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации.
5. **Помещение для самостоятельной работы** – укомплектовано специализированной (учебной) мебелью, оснащено компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечено доступом в электронную информационно-образовательную среду организации.