

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

Для заочной формы обучения

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**по дисциплине**

**«ДИНАМИЧЕСКАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ»**

Направление подготовки 05.03.05. — Прикладная гидрометеорология  
Профиль подготовки — Прикладная океанология  
Квалификация (степень) — Бакалавр академический

*Подлежит возврату  
на метеорологический факультет*

Санкт-Петербург  
РГГМУ  
2016

УДК 551.511(072)  
ББК 26.233я73  
М54

*Одобрены учёным советом  
метеорологического факультета РГГМУ*

Методические указания по дисциплине «Динамическая метеорология» для высших учебных заведений. Направление подготовки 05.03.05. — Прикладная гидрометеорология. Профиль подготовки — Прикладная океанология. Квалификация (степень) — Бакалавр академический / Сост. Н.С. Ерёмина. — СПб.: РГГМУ, 2016. — 16 с.

Методические указания составлены в соответствии с программой дисциплины «Динамическая метеорология». Даются рекомендации по изучению дисциплины. Приводятся вопросы для самопроверки, рекомендуемая литература, контрольная работа.

*Составитель* Ерёмина Н.С., доц. каф. ДАКЗ РГГМУ.

*Ответственный редактор* Егоров К.Л., к.ф.-м.н., доц. каф. ДАКЗ РГГМУ.

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Теоретическая, или динамическая, метеорология является разделом физики атмосферы, который основывается на законах сохранения импульса, массы и энергии, выраженных в виде дифференциальных уравнений, связывающих скорость ветра, температуру, плотность и давление. Задачей динамической метеорологии является изучение формирования и эволюции полей метеорологических элементов в атмосфере теоретическими методами.

Для океанолога динамическая метеорология важна как составная часть современного подхода к изучению процессов в океане на основе взаимодействия океана и атмосферы. В связи с этим главное внимание в курсе уделяется изучению строения пограничного и приземного слоя атмосферы, а также процессов, протекающих вблизи границы раздела «воздух—вода».

Методические указания не заменяют программу по курсу (где более полно отражены все вопросы, составляющие содержание курса), а призвано только отразить главное в курсе, последовательность и преемственность в усвоении материала. Вопросы для самопроверки знаний не могут служить исчерпывающим критерием для определения уровня знаний всего раздела, они призваны, в основном, только обратить внимание на наиболее существенный материал. При изучении динамической метеорологии необходимо уметь использовать простейший математический аппарат, связанный с формулировкой и решением физических задач.

Программой предусмотрено выполнение одной контрольной работы, содержащей задачи по разным разделам курса.

К выполнению контрольной работы следует приступать только после изучения соответствующих разделов курса по рекомендованной литературе. Желательно разобраться с примерами решения задач в [3]. Сведения о расчетных формулах содержатся в [1–5], а справочные данные о метеорологических константах — в [4].

Контрольная работа состоит из 6 задач, каждая из которых имеет 5 вариантов задания условий. Выбор варианта производится в соответствии с последней цифрой номера зачетной книжки: 0, 1 — 1-й вариант; 2, 3 — 2-й вариант; 4, 5 — 3-й вариант; 6, 7 — 4-й вариант; 8, 9 — 5-й вариант.

После формулировки задачи и вариантов задания исходных данных дается краткое пояснение — указывается соответствующий раздел курса и даются общие рекомендации по решению задачи.

В результате изучения дисциплины «Динамическая метеорология» формируются следующие компетенции:

**ОК-2** — способность решать стандартные профессиональные задачи на основе информационной и библиографической культуры с применением

информационно-коммуникационных технологий и с учетом требований информационной безопасности.

**ОПК-3** — способность анализировать и интерпретировать данные натуральных и лабораторных наблюдений, теоретических расчетов и моделирования.

**ПК-4** — способность к решению гидрометеорологических задач, достижению поставленных критериев и показателей.

**ПК-5** — способность реализации решения гидрометеорологических задач и анализа полученных результатов.

## Литература

1. *Подольская Э.Л.* Механика жидкости и газа. Разд. «Геофиз. гидродинамика»: учебное пособие — СПб.: РГГМУ, 2007. — 154 с.
2. *Клемин В.В., Кулешов Ю.В., Суворов С.С., Волковский Ю.Н.* Динамика атмосферы: учебник. — СПб.: Наука, 2013. — 421 с.
3. *Радикевич В.М.* Динамическая метеорология для океанологов. — Л.: Изд-во ЛПИ (ЛГМИ), 1985. — 157 с.
4. *Задачник по динамической метеорологии.* — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 166 с.
5. *Динамическая метеорология / под ред. Д.Л. Лайхтмана.* — Л.: Гидрометеоиздат, 1976. — 608 с.

## УКАЗАНИЯ ПО РАЗДЕЛАМ

### Общие принципы и инструменты динамической метеорологии

Рассматриваются общие принципы и разные методы исследования движения жидкости (метод Лагранжа и метод Эйлера). Описывается связь полной, локальной и конвективной производных. Для ламинарного движения жидкости выводятся молекулярные потоки субстанции и сила трения. Поясняются условия перехода от ламинарного движения к турбулентному. Рассматриваются разные дифференциальные характеристики метеорологических полей (градиент, дивергенция, вихрь и лапласиан). Излагается основы теории подобия и анализа размерностей.

### Литература

- [3] — Введение, § 2.1.  
[4] — § 1.1, 1.2.  
[5] — § 7.1, 7.2.

### ***Вопросы для самопроверки***

1. В чем различие Лагранжева и Эйлера описания движения жидкости?
2. От чего зависит изменение свойства в фиксированной точке пространства?
3. Что определяет переход ламинарного движения жидкости в турбулентное?
4. Какие дифференциальные характеристики являются векторами, а какие скалярами?
5. Когда целесообразно использовать теорию подобия и анализ размерности?

### **Основные уравнения динамики и термодинамики атмосферы**

Выводятся основные уравнения динамики и термодинамики атмосферы: уравнение состояния, уравнения движения, неразрывности, притока тепла и водяного пара. В уравнениях движения определяются силы, действующие в атмосфере. В уравнениях притока тепла и водяного пара определяются притоки тепла и водяного пара (молекулярные и фазовые притоки, лучистый приток тепла). Напоминаются некоторые основы статики и термодинамики атмосферы (уравнение статики и барометрические формулы; изменение температуры перемещающейся по вертикали массы воздуха; условия вертикальной статической устойчивости).

### ***Литература***

[3] — § 2.1, 2.3, 2.4, 2.5.

### ***Вопросы для самопроверки***

1. Следствием каких основных физических законов являются уравнения движения, неразрывности, притока тепла и водяного пара?
2. Как изменяется сила тяжести в зависимости от широты?
3. Как направлена сила Кориолиса по отношению к движению в Северном полушарии?
4. Какая сила вызывает горизонтальное движение воздуха?
5. Из чего складываются лучистые притоки тепла в атмосфере?
6. С какими фазовыми переходами связан фазовый приток тепла в атмосфере?
7. Какие критерии определяют условия вертикальной статической устойчивости? Как влияет на нее вертикальное распределение влажности?

### **Замкнутая система уравнений для турбулентной атмосферы**

Мгновенные значения метеорологических характеристик представляются в виде суммы среднего и пульсации. С учетом спектров метеорологических характеристик обсуждается вопрос об определении средних значений.

С учетом аксиом осреднения рассматривается процедура осреднения полученной ранее системы уравнений и разные подходы к ее замыканию. Подробно излагается полумпирическая теория турбулентности: выражения для турбулентных потоков и притоков субстанции, уравнение баланса кинетической энергии турбулентности и дополнительные соотношения, полученные на основании физической аналогии с молекулярным перемешиванием или анализа размерностей. Записывается замкнутая система уравнений. Рассматриваются разные подходы к упрощению уравнений на примере уравнения притока тепла и уравнений движения. При упрощении третьего уравнения движения получается уравнение, подобное уравнению статики атмосферы. На примере упрощения первого уравнения движения производится классификация атмосферных движений (стационарные, горизонтально-однородные и плоские), а также вводится понятие планетарного пограничного слоя и свободной атмосферы. Обращается внимание на неформальность процедуры упрощения уравнений.

### *Литература*

[3] — § 2.6, 2.7, 2.8, 2.9.

[4] — Приложения 5 и 6.

[5] — § 7.7.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Какая особенность спектров метеорологических характеристик позволяет отфильтровывать турбулентные пульсации?
2. Как используются аксиомы осреднений при осреднении уравнений?
3. Какие дополнительные слагаемые появляются при осреднении уравнений и какой физический смысл они имеют?
4. Какие характеристики турбулентности вводятся в рамках полумпирической теории турбулентности?
5. Какие соотношения используются для замыкания системы осредненных уравнений?
6. Какие подходы существуют к упрощению уравнений?
7. Какие критерии определяют условие стационарности, горизонтальной однородности и плоского характера атмосферных движений? Что такое планетарный пограничный слой и свободная атмосфера?

### **Динамика и термодинамики свободной атмосферы**

Вводится понятие абсолютного и относительного геопотенциала. Рассматриваются разные единицы для определения геопотенциала и карты барической топографии. Полученная в предыдущем разделе система уравнений используется для описания динамики свободной атмосферы. Вводятся

понятия геострофического (для прямолинейных изобар) и градиентного (для круговых изобар) ветра, устанавливается связь между ними. Понятия геострофического и градиентного ветра широко используются для расчета ветра по полю давления. Изменение геострофического ветра с высотой, связанное с влиянием горизонтального градиента температуры, называется термическим ветром. Рассматриваются предельные случаи соотношений между направлением градиента давления и температуры, приводящие к различному изменению модуля и направления геострофического ветра с высотой, а также к различной адвекции тепла или холода. Для количественной оценки адвекции в изотермическом приближении получаются формулы, связывающие скорость адвективных изменений с градиентами давления и температуры. На основе понятия термического ветра можно решить ряд важных метеорологических задач: определить геострофический ветер на заданной высоте, если известен ветер на исходном уровне и средний горизонтальный градиент температуры в слое; определить высоту, где скорость геострофического ветра становится равной нулю (уровень обращения ветра); по известному профилю геострофического ветра определить средний горизонтальный градиент температуры в разных слоях.

Вводится понятие фронтальных поверхностей и фронтов. С учетом динамического и кинематического граничного условия выводится выражение для угла наклона фронтальных поверхностей и объясняется положение фронтов в барическом поле.

Рассматриваются характеристики волн. Анализируются дисперсионные уравнения для гравитационных и инерционных (волн Россби) волн в атмосфере.

### *Литература*

[3] — Гл. 3 и § 2.5.

[4] — Гл. 4, 5, 6.

[5] — Гл. 9, § 10.1, 10.2, 10.6.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Что такое абсолютный и относительный геопотенциал? В каких единицах они измеряются? Что характеризуют карты относительной топографии?
2. Что такое геострофический ветер? Как он направлен относительно изобары (изогипсы)?
3. Почему нельзя использовать понятие геострофического ветра вблизи экватора? Какие силы здесь должны уравновешивать силу барического градиента?
4. Что такое градиентный ветер? Как он направлен в свободной атмосфере в циклоне и антициклоне Северного полушария? Какое ограничение существует для градиента давления в антициклоне Северного полушария?

5. Что такое термический ветер? От каких характеристик и как зависит его модуль и направление?
6. Адвекцию тепла или холода можно ожидать при левом повороте ветра с высотой?
7. От чего зависит угол наклона фронтальной поверхности?
8. Какое условие выполняется для касательных к линии фронта составляющих геострофического ветра? С какими барическими образованиями связаны фронты?
9. Каковы физические механизмы возникновения гравитационных и инерционных волн?
10. Какой порядок имеют длины и фазовые скорости гравитационных и инерционных волн?

### **Планетарный пограничный (ППС) и приземный (ПС) слой атмосферы**

Рассматриваются особенности метеорологических процессов в ППС и ПС, а также особенности их строения над водной поверхностью. На основе этого и полученных ранее уравнений записывается общая замкнутая система уравнений для ППС. Наиболее простые модели с возможностью аналитического решения связаны с рассмотрением стационарного и горизонтально-однородного ППС и ПС. Для указанных условий рассматривается модель приземного слоя, основанная на использовании теории подобия (модель Монины – Обухова). Получаются аналитические выражения для профилей метеорологических элементов и характеристик турбулентности при разных условиях стратификации. Модель, основанная на теории подобия, обобщается на случай учета стратификации влажности. Объясняется процедура определения турбулентных потоков тепла, водяного пара и количества движения. Далее рассматриваются модели стационарного, горизонтально-однородного ППС с априорным заданием коэффициента турбулентности, причем наиболее подробно рассмотрена модель с  $k = \text{const}$ . Решение полученной при этом системы уравнений ищется в три этапа: из уравнений движения определяется профиль скорости ветра (спираль Экмана), а из уравнения притока тепла и водяного пара определяется профиль температуры и массовой доли водяного пара; из остальных уравнений и полученных на первом этапе решений определяются характеристики турбулентности; с использованием полученных результатов на основании уравнения неразрывности определяется вертикальная скорость на верхней границе ППС. Для определения неизвестных постоянных используются эмпирические данные.

Дается качественное объяснение возникновения суточных колебаний метеорологических характеристик. Приводится постановка задачи и дается физический анализ полученного решения для суточного колебания температуры воздуха. Объясняется физический механизм ночного

понижения температуры и из анализа размерностей получается формула Брента, описывающая ночное понижение температуры за счет эффективного излучения и теплофизических свойств почвы.

### *Литература*

[3] — Гл. 4.

[4] — § 7.1, 7.2, 7.3, 7.4.

[5] — Гл. 11, 13.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Какой слой атмосферы называют пограничным слоем? Каковы основные особенности формирования метеорологических полей в нем?
2. Какой слой атмосферы называют приземным слоем? Каковы его основные особенности?
3. Какой физический смысл имеет параметр  $z/L$ ? Как он связан с числом Ричардсона?
4. Какие профили метеорологических величин и коэффициента турбулентности получаются при безразличной и близкой к безразличной стратификациях, а также при свободной конвекции и сильной инверсии?
5. Как влияет вертикальное распределение массовой доли водяного пара над океаном на устойчивость? Где оно сказывается сильнее: в низких или умеренных широтах?
6. Какие условия обычно используют для определения высоты ППС?
7. Какой поворот ветра в зависимости от рассматриваемого полушария существует в ППС и как годограф скорости зависит от широты и коэффициента турбулентности?
8. Как влияет ППС на свободную атмосферу? От каких параметров зависит вертикальная скорость на верхней границе ППС?
9. Как влияет средний в ППС горизонтальный градиент температуры на годограф ветра?
10. От каких физических параметров и как зависит суточный ход температуры?
11. При каких метеорологических условиях происходит заметное ночное понижение температуры и возможны заморозки?
12. Какие практические мероприятия можно рекомендовать при угрозе заморозка?

### **Процессы над горизонтально-неоднородной подстилающей поверхностью**

Приводится общая формулировка задачи о трансформации воздушного потока для малых высот. Хотя процесс трансформации должен описываться замкнутой системой уравнений (изменение одной характеристики

сказывается на других), задача условно разделяется на изучение трансформации поля температуры (влажности) и скорости ветра. В первом случае подробно рассматривается модель трансформации при постоянных скорости ветра и коэффициенте турбулентности, а затем поясняется ход решения задачи и приводятся конечные решения для случая, когда они являются степенными функциями высоты. Во втором случае изучается трансформация поля ветра за счет изменения шероховатости подстилающей поверхности. Решение задачи ищется в виде разложения в ряд по малому параметру, который зависит от соотношения динамических скоростей над исходной и новой поверхностью. Поясняются практические приложения теории трансформации.

С помощью теорем об ускорении циркуляции качественно объясняются такие явления, как бризы и муссоны. Первые из них связаны с суточной неравномерностью нагревания суши и воды, вторые — с сезонной. Соотношение, полученное для ускорения циркуляции при наличии изобаро-изотермических соленидов, хорошо объясняет не только сам факт циркуляции, но и дает близкие к реальным средние скорости бриза.

### *Литература*

- [3] — Гл. 5.
- [4] — § 7.5, 8.2.
- [5] — Гл. 12.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Почему при изменении шероховатости подстилающей поверхности должно трансформироваться поле температуры?
2. Можно ли пользоваться решением задачи о трансформации поля температуры и влажности при  $k = \text{const}$  для больших расстояний от границы раздела?
3. Как объяснить зависимость высоты внутреннего пограничного слоя от скорости ветра ( $u = \text{const}$ ) и коэффициента турбулентности ( $k = \text{const}$ )?
4. Почему количество испарившейся воды зависит от формы испарителя?
5. Как использовать решение задачи о трансформации поля температуры и влажности для прогноза формирования тумана?
6. В чем состоит механизм трансформации поля ветра при изменении шероховатости?
7. Какие факторы определяют возникновение и развитие бризовой и муссонной циркуляции?
8. Как объяснить возникновение наклона изотермических и изобарических поверхностей на границе «суша—вода» в ночное время? Как направлен ночной бриз?
9. Исходя из каких соображений можно оценить размеры контура при использовании теоремы об ускорении циркуляции за счет бароклинности?

## **Энергетика атмосферы. Основы общей циркуляции атмосферы**

Рассматриваются основные виды энергии в атмосфере. Из анализа уравнений сохранения для кинетической энергии среднего движения и турбулентных пульсаций, а также для внутренней энергии поясняется взаимный переход разных видов энергии. Объясняется интегральный замкнутый цикл преобразования разных видов энергии. Приводятся основные элементы общей циркуляции атмосферы, дается объяснение физического механизма ее возникновения и краткая характеристика моделей.

### *Литература*

[3] — § 8.1.

[5] — Гл. 15.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Какие основные виды энергии нужно учитывать в атмосфере?
2. Какие факторы определяют изменение кинетической энергии среднего движения и внутренней энергии?
3. Какова схема преобразования энергии в атмосфере?
4. Что понимается под термином общая циркуляция атмосферы?

# КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

## Задача 1

Вычислить изменение температуры за 1 час, которое будет зарегистрировано приборами на свободном уравновешенном аэростате при следующих условиях на уровне полета: скорость ветра  $V$  м/с, направление ветра составляет с направлением максимального убывания температуры угол, равный  $\alpha^\circ$ , расстояние между единичными изотермами на карте масштаба  $1:10^7$  равно 1 см, приборы на привязном аэростате зарегистрировали повышение температуры на уровне полета на  $0,7^\circ\text{C}$  за 1 час.

Таблица 1

Варианты исходных данных

Вариант	1	2	3	4	5
$V$ , м/с	5	10	15	15	15
$\alpha^\circ$	40	40	40	30	60

## Задача 2

Как должно измениться давление на уровне моря, если при повышении средней температуры на  $\Delta T$  К изобарическая поверхность 700 гПа поднялась на 20 гПм?  $T = 270$  К, давление на уровне моря 1000 гПа.

Таблица 2

Варианты исходных данных

Вариант	1	2	3	4	5
$\Delta T$	4	3	2	1	0

*Пояснение.* Задача на понятие абсолютного геопотенциала. Следует иметь в виду, что имеется готовая формула, которая связывает изменение геопотенциала с изменением давление у поверхности земли и изменением средней температуры слоя.

## Задача 3

Определить величину и направление среднего горизонтального градиента температуры в слое от 1 до 3 км, если ветер на высоте 3 км северный 10,6 м/с, а на высоте 1 км — северо-западный 8,3 м/с. Широта места  $\varphi^\circ$ ,  $T = 290$  К.

Таблица 3

Варианты исходных данных

Вариант	1	2	3	4	5
$\varphi, ^\circ$	60	50	45	40	30

*Пояснение.* Задача на понятие термического ветра. С учетом векторного характера задачи целесообразно представить ее графически (учитывая особенности определения направления ветра в метеорологии).

#### Задача 4

Для высоты 200 м. на широте  $\varphi^\circ$  при скорости геострофического ветра  $G$  м/с и коэффициенте турбулентности  $5 \text{ м}^2/\text{с}$  рассчитать: горизонтальные составляющие скорости ветра, величину и направление силы барического градиента, силы Кориолиса и силы трения. Плотность воздуха  $1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Таблица 4

Варианты исходных данных

Вариант	1	2	3	4	5
$\varphi, ^\circ$	60	60	50	45	30
$G, \text{ м}/\text{с}$	10	15	10	10	10

*Пояснение.* Задача на ППС и силы, действующие в атмосфере. Требуется использовать выражения для спирали Экмана.

#### Задача 5

Определить параметр шероховатости подстилающей поверхности, касательное напряжение трения и коэффициент турбулентности на высоте 1 м (при нейтральной стратификации) по следующим данным о вертикальном профиле ветра  $u(z)$  в м/с:

Таблица 5

Варианты исходных данных

$z, \text{ м}$	Вариант				
	1	2	3	4	5
0,5	2,1	3,0	3,5	3,8	2,5
1,0	2,4	3,4	3,9	4,2	3,0
2,0	2,6	3,9	4,4	4,7	3,5
5,0	3,0	4,5	5,0	5,3	4,1
9,0	3,3	4,8	5,3	5,6	4,6

*Пояснение.* Задача на ПС при нейтральной стратификации. Параметр шероховатости и динамическую скорость требуется определить графическим способом.

### Задача 6

Рассчитать скорость ветра, температуру и массовую долю водяного пара на высоте  $z = 10$  м, если  $\beta = 6,0$ ,  $z_0 = 0,4$  м,  $T_0 = 17$  °С,  $q_0 = 5,7$  ‰,  $P_0$  в Вт/м<sup>2</sup> и  $E_0$  — в мм/ч.

Таблица 6

Варианты исходных данных

Вариант	1	2	3	4	5
$P_0$	205,5	-205,5	210,5	-210,5	210,5
$E_0$	0,2	0,2	0,5	0,4	0,7

*Пояснение.* Задача на ПС при стратификации, близкой к безразличной. Нужно обратить внимание на несистемные единицы  $E_0$ .

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ .....	3
Литература .....	4
УКАЗАНИЯ ПО РАЗДЕЛАМ .....	4
Общие принципы и инструменты динамической метеорологии .....	4
Основные уравнения динамики и термодинамики атмосферы .....	5
Замкнутая система уравнений для турбулентной атмосферы .....	5
Динамика и термодинамики свободной атмосферы .....	6
Планетарный пограничный (ППС) и приземный (ПС) слой атмосферы .....	8
Процессы над горизонтально-неоднородной подстилающей поверхностью .....	9
Энергетика атмосферы. Основы общей циркуляции атмосферы .....	11
КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА .....	12
Задача 1 .....	12
Задача 2 .....	12
Задача 3 .....	12
Задача 4 .....	13
Задача 5 .....	13
Задача 6 .....	14

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

*Составитель* Надежда Сергеевна Ерёмина

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
по дисциплине  
«ДИНАМИЧЕСКАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ»

*Редактор* Н.И. Афанасьева  
*Технический редактор* Ю.И. Климов

---

Подписано в печать 06.10.16. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура Newton.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 50 экз. Заказ № 532/2.  
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.  
Отпечатано в ЦОП РГГМУ

---